



La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications

Jean-Paul Chilès

► To cite this version:

Jean-Paul Chilès. La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications. Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2004. tel-00542319

HAL Id: tel-00542319

<https://theses.hal.science/tel-00542319>

Submitted on 2 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ACADÉMIE DE PARIS
UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Mémoires des Sciences de la Terre

N° 2004.01

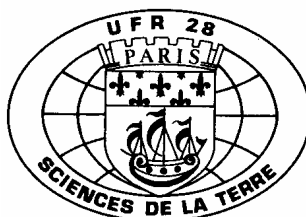
La modélisation géostatistique
de la variabilité spatiale
et ses applications

Jean-Paul Chilès

Habilitation à diriger des recherches
26 mars 2004

Jury

Ghislain DE MARSILY,	Université Pierre et Marie Curie,	Examineur
Xavier GUYON,	Université de Panthéon-Sorbonne,	Examineur
Jean JACOD,	Université Pierre et Marie Curie,	Rapporteur
Jean-Laurent MALLET,	Institut National Polytechnique de Lorraine,	Rapporteur
Michel SCHMITT,	École des Mines de Paris,	Examineur
Paul SWITZER,	Stanford University,	Rapporteur
Albert TARANTOLA,	Institut de Physique du Globe de Paris,	Président



Résumé

La synthèse comporte trois parties. La première présente les modèles probabilistes développés en géostatistique pour décrire la variabilité de variables naturelles réparties dans l'espace, estimer leur valeur en dehors des points de mesure, construire des modèles numériques rendant compte de la variabilité spatiale, et caractériser l'incertitude des données et des modèles numériques. Elle couvre l'ensemble de la géostatistique qui s'est développée au long de la deuxième moitié du 20^e siècle sous l'impulsion de Georges Matheron : analyse structurale (calcul et modélisation du variogramme), estimation linéaire (krigeage), modèles non stationnaires, méthodes multivariées, changement de support et méthodes non linéaires (krigeage disjonctif), simulations conditionnelles, effet d'échelle et problèmes inverses. Les différentes méthodes géostatistiques sont mises en perspective en présentant à la fois les aspects théoriques et pratiques. Des applications réelles sont présentées, comme une modélisation des formations géologiques pour le tunnel sous la Manche et la comparaison entre prédiction et réalité.

La seconde partie présente les développements réalisés pour la modélisation stochastique des milieux fracturés, et principalement pour la modélisation de réseaux de fractures à partir d'observations en forage ou sur affleurement. Deux modèles très flexibles ont été développés à partir d'observations de sites réels, l'un pour les granites (disques aléatoires éventuellement en salves ou à densité régionalisée), l'autre pour des milieux sédimentaires stratifiés (modèle hiérarchique). Des méthodes d'identification des paramètres sont proposées, ainsi que des méthodes de simulation conditionnelle. Les effets d'échelle et le lien avec la modélisation des écoulements sont également abordés.

La dernière partie est consacrée aux travaux en cours ou en projet : identification de lois marginales non stationnaires, statistiques multipoints et choix de modèles, modèles spatio-temporels, modélisation géologique 3D, données territoriales ou sur graphes, modèles génétiques stochastiques, assimilation de données, prise en compte d'essais hydrauliques dans la simulation de réseaux de fractures.

Abstract

The first part of this synthesis deals with statistical models used to describe the variability of natural variables distributed in space, to predict their value at unsampled locations, to build numerical models that account for spatial variability, and to characterize the uncertainty of data and models. It covers the full range of geostatistics as it was developed over the second half of the 20th century under the impetus of Georges Matheron: structural analysis (variogram computation and fitting), linear prediction (kriging), nonstationary models, multivariate methods, change of support and nonlinear methods (disjunctive kriging), conditional simulations, scale effect and inverse problems. The presentation offers an accurate perspective of the different geostatistical methods. Practical and theoretical aspects of geostatistics balance each other. Real-world applications are presented, such as a modelling of the geological formations for the Channel tunnel and a comparison between prediction and reality.

The second part presents the developments carried out for the stochastic modelling of fractured media, and especially of fracture networks, from borehole and outcrop measurements. Two very flexible models have been developed from the observation of actual sites, one for granite (random discs, possibly in clusters or with a regionalized density), the other for stratified sedimentary media (hierarchical model). Parameter identification methods are available, as well as conditional simulation methods. Scale effects and the link with flow modelling are also presented.

The last section is devoted to works which are currently carried out or in project: identification of nonstationary marginal distributions, multipoint statistics and model choice, space-time models, 3D geological modelling, stochastic process-based models, territorial data and data on graphs, data assimilation, interpretation of flow tests and simulation of fracture networks.

Sommaire

Introduction	1
1. Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty	3
1.1. Introduction, 3	
1.2. L'analyse structurale, 4	
1.3. Le krigage, 6	
1.4. Le modèle intrinsèque d'ordre k , 7	
1.5. Les méthodes multivariées, 7	
1.6. Les méthodes non linéaires, 9	
1.7. Les simulations conditionnelles, 11	
1.8. Effet d'échelle et méthodes inverses, 13	
2. Modélisation stochastique des milieux fracturés	15
2.1. Introduction, 15	
2.2. Modélisation d'un réseau de fractures : démarche générale, 16	
2.3. Modélisation de la petite fracturation dans les granites, 17	
2.4. Modélisation de la fracturation dans un milieu stratifié, 20	
2.5. Modélisation de la fracture unique, 21	
2.6. Approches de l'écoulement, 24	
3. Perspectives	29
3.1. Modélisation de la loi marginale, 29	
3.2. Modélisation géologique 3D, 32	
3.3. Quelques nouveaux modèles probabilistes, 35	
3.4. Prise en compte de lois et processus physiques et géologiques, 37	
3.5. Milieux fracturés, 39	
3.6. En guise de conclusion, 43	
Références	45
Curriculum vitae	51

Publications annexées

- Chilès, J.P., and P. Delfiner (1999). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons, New York. [volume séparé]
- Chilès, J.P., and G. de Marsily (1993). Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. Chap. 4 of *Flow and contaminant transport in fractured rock*, J. Bear, G. de Marsily, and C.F. Tsang, eds. Academic Press, San Diego, California.
- Castaing, C., A. Genter, B. Bourguine, J.P. Chilès, J. Wendling, and P. Siegel (2002). Taking into account the complexity of natural fracture systems in reservoir single-phase flow modelling. *Journal of Hydrology*, **266(1–2)**, 83–98.
- Chilès, J.P., B. Bourguine, C. Castaing, and A. Genter (2000). Stochastic modelling and simulation of fracture networks in petroleum and geothermal reservoirs. In *Geostatistics 2000 Cape Town*, W.J. Kleingeld and D.G. Krige, eds. Geostatistical Association of Southern Africa, Vol. 1, 413–423.

Remerciements

Solliciter une habilitation à diriger des recherches après plus de trente années d'exercice de la géostatistique est une occasion unique de regarder en avant sans oublier tout ce que je dois à ceux qui m'ont accompagné.

Je me dois tout d'abord de rendre hommage à celui que nous appelions "le Maître", et qui le reste, Georges Matheron, sans qui ce mémoire n'existerait pas, et qui m'a permis de trouver un terrain où tenter d'appivoiser le hasard. Sa culture scientifique et sa culture tout court étaient pour moi incommensurables et je n'oublierai pas que, même lorsque j'avais quitté le Centre de géostatistique, son bureau restait ouvert pour discuter un point délicat ou une application nouvelle.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance aux chercheurs que j'ai côtoyés dans ma première période bellifontaine, à commencer par ceux avec qui j'ai plus particulièrement travaillé : Pierre Chauvet, avec qui je partageais alors mon bureau ainsi que la lecture de la note 117, Jean-Pierre Delhomme qui venait colorier notre tableau noir d'œuvres d'art éphémères, et Pierre Delfiner, avec qui ce fut le début d'une longue et fructueuse amitié. Que Pierre trouve ici ma reconnaissance pour sa confiance, sa ténacité et son souci d'aller au fond des choses. Je n'oublie pas mes autres compagnons d'alors, et notamment ceux qui comme André Journel sont partis à la conquête d'autres continents, ainsi que Christian Lantuéjoul pour les échanges fructueux que nous avons maintenus pendant ma période orléanaise.

J'ai plaisir à remercier tous ceux qui au BRGM ont pensé que la géostatistique pouvait apporter quelque chose aux problèmes auxquels ils étaient confrontés et qui ont eu le courage et la persévérance de se frotter à la géostatistique ou de me former à leur thématique. Je dois en particulier à Patrick Margron, responsable des études BRGM pour le projet de tunnel sous la Manche, des conditions idéales pour ma plus belle application de la géostatistique, qui constitue de surcroît une contribution à une des sept merveilles du monde moderne selon l'ASCE (l'association américaine des ingénieurs en génie civil). Je suis également très redevable à mes compagnons géostatisticiens, Raymonde Blanchin et Bernard Bourguine, ainsi qu'à ceux qui ont évolué vers d'autres disciplines : Éric Lefeuvre, Jean-Paul Marbeau, Daniel Thomas, François Robida, Fabrice Deverly ; à Hong-Tao Liao et Chris Roth dont les travaux de thèse m'ont permis d'approfondir certains domaines de la géostatistique ; à l'équipe des modélisateurs 3D et en particulier à Gabriel Courrioux, Antonio Guillen, Philippe Calcagno et Jacques Vairon. Et je n'oublie pas le soutien apporté par la Direction scientifique puis par la Direction de la recherche à la rédaction de l'ouvrage de géostatistique publié chez Wiley.

Je dois une mention toute particulière à ceux qui à travers toutes les restructurations et au-delà de projets toujours éphémères ont constitué l'équipe informelle des milieux fracturés du BRGM, preuve qu'un intérêt scientifique commun, une forte complémentarité et une réelle amitié peuvent faire mieux que suppléer une carence organisationnelle. Parmi les initiateurs,

REMERCIEMENTS

Jean-Louis Blès en géologie structurale et Bernard Feuga dont la culture scientifique débordait largement la géotechnique et la mécanique des roches et n'avait d'égale que la simplicité. Puis l'équipe Berkeley avec Daniel Billaux comme tête de pont aux compétences pluridisciplinaires et Sylvie Gentier, la spécialiste incontournable de la fracture unique, et plus précisément à cette époque des crêpes en résine. Plus récemment l'équipe P04, emmenée par Christian Castaing puis Albert Genter, qui n'avaient pas leur pareil pour dénicher de superbes analogues, notamment dans l'Utah ou en Sardaigne, et y organiser des reconnaissances passionnantes. Je n'oublie bien sûr ni mon comparse géostatisticien Bernard Bourguine, ni les thésards qui se sont succédés, Hamid Massoud et sa machine à relever les fractures, Philippe Loiseau qui avait dévié de la géologie structurale vers la géostatistique, Fabrice Gervais qui avait proposé un premier modèle pour un milieu stratifié, Guy Ouillon qui m'a conforté dans l'idée que fractures et fractales ne faisaient pas toujours bon ménage, ni les hydrogéologues qui n'ont fait qu'un passage, de plus en plus court, avant d'être happés comme Daniel Billaux par les agences de stockage et leurs consultants : Frédéric Guérin, Éric Fillion, Jacques Wendling, Pascal Siegel.

Tout le travail sur les fractures doit bien sûr énormément à Jane Long et à son équipe de Berkeley. Que Jane soit remerciée pour son talent, sa curiosité d'esprit, la confiance qu'elle nous accordait, la qualité de son animation scientifique, son sens de l'accueil.

C'est avec beaucoup de plaisir que ma seconde période bellifontaine me permet de retrouver d'anciens collègues mais aussi de faire connaissance de nouveaux collègues et doctorants. C'est pour moi l'occasion de découvrir les développements novateurs des statistiques spatiales, notamment dans les domaines qui sortent des sciences de la Terre comme l'épidémiologie ou la bioinformatique. Je les remercie de tout cœur, ainsi que l'instigateur de ces développements, mon prédécesseur Michel Schmitt, actuel Directeur de la recherche à l'École des Mines et examinateur de ce travail, et Benoît Legait, Directeur de l'École, pour la confiance qu'ils me témoignent.

La recherche se nourrit aussi des collaborations et échanges avec des chercheurs d'autres organismes, que ce soit à l'occasion de projets européens, de congrès ou d'autres rencontres. Je ne puis les citer tous, mais je dois une mention toute particulière à Ghislain de Marsily, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et membre de l'Académie des Sciences, initiateur avec Jean-Pierre Delhomme du développement de l'approche géostatistique en hydrogéologie, pour la confiance qu'il m'a maintes fois témoignée, que ce soit par un chapitre écrit en commun ou à l'occasion de l'encadrement de doctorants. Je suis très touché qu'il m'ait encouragé à présenter ce mémoire et lui en suis très reconnaissant.

J'ai toujours apprécié la pertinence des points de vue de Paul Switzer, Professeur de statistiques à l'Université de Stanford, sur la géostatistique, et sa capacité à établir des ponts entre géostatistique et statistiques. Il avait assumé la relecture du manuscrit de l'ouvrage publié chez Wiley et a encore accepté d'être rapporteur de ce mémoire malgré la difficulté de la langue. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Il m'est également très agréable de remercier Jean Jacod, Professeur de probabilités à l'Université Pierre et Marie Curie, précurseur de l'approche génétique et stochastique lors de son passage par le Centre de géostatistique, de m'avoir fait l'amitié d'accepter la tâche de rapporteur.

Je suis également très heureux que Jean-Laurent Mallet, Professeur à l'École de géologie de Nancy et inventeur de DSI et gOcad, une méthodologie de modélisation géologique 3D

REMERCIEMENTS

complémentaire de la géostatistique, ait marqué un intérêt enthousiaste pour ce travail et ait accepté d'en être rapporteur, et je lui en sais gré.

Lors d'un récent séminaire de la SFdS sur les statistiques spatiales, j'ai eu le bonheur de pouvoir apprécier l'ouverture d'esprit, l'enthousiasme et l'attention de Xavier Guyon, Professeur émérite à l'Université Panthéon-Sorbonne. Aussi je suis très touché qu'il ait accepté d'examiner ce travail.

J'ai été très impressionné par le travail d'Albert Tarantola, Professeur à l'Institut de Physique du Globe, sur des méthodes d'inversion stochastique en géophysique qui présentent une forte parenté avec les méthodes géostatistiques développées ultérieurement. Je suis très honoré qu'il ait accepté d'examiner ce travail et de présider le jury.

Il ne serait pas juste d'oublier tous ceux à qui je dois ma formation initiale, et sans qui la suite ne serait pas. Une mention particulière aux professeurs du lycée Fabert et aux enseignants de l'École des mines, et une mention spéciale à mon instituteur et père, Jean Chilès.

Que mes proches trouvent enfin ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur soutien sans faille et leur grande patience, ainsi que la sollicitation de leur indulgence pour tout le temps que j'eusse pu leur consacrer et qui leur a été dérobé par ma passion pour la géostatistique.

Introduction

A l'appui de ma demande d'habilitation à diriger des recherches je présente le bilan de plus de trente années professionnelles dédiées essentiellement à la géostatistique et au développement de ses applications.

La majeure partie de mes travaux concerne des applications de la géostatistique dans des voies très diversifiées tant du point de vue des méthodes (analyse structurale, estimation linéaire, modèles non stationnaires, méthodes multivariées, méthodes non linéaires, simulation, inversion stochastique) que des domaines (topographie, océanographie, météorologie, pétrole, recherche et développement miniers, géophysique, géothermie, génie civil, hydrogéologie, modélisation géologique). Elle se trouve synthétisée dans l'ouvrage écrit en collaboration avec Pierre Delfiner : *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty* (Wiley, 1999). Celui-ci fait l'objet du chapitre 1 de ce mémoire.

J'ai par ailleurs développé des méthodes originales de modélisation stochastique des milieux fracturés, peu présentées dans l'ouvrage ci-dessus car un peu à la marge de la géostatistique classique. Elles font l'objet du chapitre 2.

Le dernier chapitre est dédié aux perspectives.

CHAPITRE 1

Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty

*Au-delà de l'outil, et à travers lui, c'est la vieille nature que nous retrouvons,
celle du jardinier, du navigateur, ou du poète.*

Saint-Exupéry

1.1. INTRODUCTION

La référence à un ouvrage de ce type suscite naturellement deux questions :

- quelle est l'originalité de cet ouvrage ?
- quelle est la contribution du candidat ?

Je répondrai d'abord à la seconde question, aisée à traiter. Pierre Delfiner et moi nous sommes réparti le travail par chapitres :

- l'introduction et les préliminaires, le krigeage, le modèle intrinsèque et les méthodes multivariées pour Pierre Delfiner (chap. 1, 2, 4, 5) ;
- l'analyse structurale, les méthodes non linéaires, les simulations conditionnelles, l'effet d'échelle et les méthodes inverses pour moi (chap. 2, 6, 7, 8).

Nous avons toutefois travaillé en étroite collaboration et non indépendamment l'un de l'autre. Aussi certaines parties d'un chapitre écrit par l'un peuvent être dues à l'autre ; c'est en général assez évident car il s'agit le plus souvent d'applications dont l'origine est mentionnée. D'autre part, chacun a bénéficié des remarques de l'autre, qui ont pu impliquer le réordonnement complet de certaines sections. Quant au polissage de l'anglais, il est à mettre à l'actif de Pierre.

L'ouvrage fait par ailleurs référence aux travaux de l'un et de l'autre, et il est en pratique assez aisé de retrouver les contributions de chacun. Ceci permet également de distinguer ce qui est contribution propre de ce qui est un exposé de résultats connus. S'agissant d'un ouvrage de référence, il ne peut en effet se borner à retracer les travaux propres des auteurs mais rend compte de l'ensemble des travaux de la communauté géostatistique.

En simplifiant, la géostatistique est l'application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la Terre. Corrigeons toutefois ce qu'une telle formulation peut avoir de réducteur :

- Elle laisse penser que la théorie des fonctions aléatoires préexiste. En fait nombre de théoriciens des fonctions aléatoires étaient motivés par des problèmes applicatifs, tels la turbulence et la météorologie (Kolmogorov, Yaglom). D'autre part, des pans entiers de la théorie des fonctions aléatoires ont été développés par des chercheurs situés à la charnière de la théorie et des applications (Matheron bien sûr, mais aussi Jowett, Gandin, Matérn, etc.) pour apporter des solutions à des problèmes thématiques (modèles non stationnaires, méthodes non linéaires, simulations conditionnelles, méthodes inverses).
- Si on considère les applications à des espaces à 2 ou 3 dimensions (ou plus), les domaines concernés sont d'abord historiquement les sciences de la Terre au sens large (météorologie, mine, foresterie, hydrogéologie, pétrole, géophysique, sols pollués) mais se sont ensuite diversifiés : matériaux, halieutique, épidémiologie, bioinformatique.

La suite de cette section présente l'ouvrage chapitre après chapitre, en précisant l'enjeu de chacun et ma contribution au domaine. Un fil conducteur de cette présentation est la signification physique des modèles probabilistes utilisés. En effet le recours à des modèles et méthodes probabilistes ne résulte pas de la croyance ou du présupposé qu'un hasard présiderait à la destinée du monde mais à la simple volonté de faire ressortir l'ordre ou la structure sous-jacente à un désordre apparent. L'abstraction de la théorie ne doit pas nous éloigner du réel mais au contraire nous ramener à lui, d'une part en nous apportant des outils pour mieux connaître les lois physiques qui le gouvernent, d'autre part en nous poussant à inventer de nouveaux modèles et de nouvelles méthodes intégrant des lois toujours mieux connues.

1.2. L'ANALYSE STRUCTURALE

L'originalité principale de la démarche géostatistique est qu'elle part des données. Auparavant nombre d'articles qui présentaient une méthode d'estimation ou de simulation fondée sur la théorie des fonctions aléatoires se contentaient, au moment de l'appliquer, de faire l'hypothèse que la covariance était exponentielle, ou gaussienne, sans se préoccuper le moins du monde de savoir s'il en était bien ainsi. Or une méthode qui se présente comme optimale ne peut l'être que si on apporte tout son soin à chaque phase de son application, et tout particulièrement à la détermination de la fonction de covariance.

Le variogramme expérimental

Pour bien marquer la prééminence des données, le chapitre, après un minimum de principes théoriques, présente d'abord le variogramme expérimental. Celui-ci est une forme simplifiée d'outils d'analyse exploratoire des données plus élaborés, tel le nuage variographique. Si ce dernier n'est pas nouveau, l'informatique permet d'obtenir de façon quasi instantanée des graphiques dont l'élaboration pouvait demander une année de calcul à la main dans les années 50 (cf. Gandin, 1963). L'exposé des propriétés physiques du variogramme expérimental ne présente pas d'originalité particulière, sinon que j'ai recherché dans la mesure du possible des exemples soit parmi des études auxquelles j'avais participé, soit parmi les travaux exemplaires de pionniers. J'insiste également sur quelques uns des pièges classiques qui peuvent affecter le résultat : manque d'homogénéité dans le comportement, échantillonnage préférentiel des zones à forte valeur, données anormales.

Modèles de covariance

En ce qui concerne les propriétés mathématiques de la covariance ou du variogramme théorique, j'ai mis en ordre une littérature abondante. J'ai particulièrement développé l'origine et la signification physique des divers modèles de variogramme présentés, ainsi que leur lien avec d'autres théories, comme les fractales. Un exemple caractéristique est issu de la géophysique, plus précisément de l'étude des champs de potentiel. Après correction de l'effet de relief, les anomalies proviennent des "sources" présentant un contraste de densité ou d'aimantation. Lorsque les sources n'ont pas de forme simple, il est assez naturel de les représenter par un modèle stochastique. L'anomalie gravimétrique est alors une fonction aléatoire dont les caractéristiques découlent de celles des sources. Ainsi lorsque les sources sont des parallélépipèdes situés à une profondeur moyenne p et se prolongeant vers le bas, on montre que les covariances du champ gravimétrique et du champ magnétique réduit au pôle sont en première approximation de la forme :

$$C_G(r) = c_G \left(1 + \frac{r^2}{a^2} \right)^{-1/2} \quad C_M(r) = c_M \left(1 + \frac{r^2}{a^2} \right)^{-3/2}$$

où le paramètre d'échelle a (qui est une distance horizontale) est égal à la moitié de la profondeur moyenne des sources p . Ces modèles sont paraboliques à l'origine, ce qui est normal puisque les champs de potentiel réalisent une intégration 3D des propriétés physiques et sont donc très réguliers. On sait que le comportement à l'origine d'un tel variogramme peut présenter des fluctuations statistiques importantes. Connaître sa forme analytique est donc un atout précieux. Nous reverrons ce point plus loin. Ces covariances constituent des cas particuliers du modèle de Cauchy généralisé où l'exposant peut prendre toute valeur négative.

La section se termine par des indications sur la cohérence interne des modèles : lorsque la variable étudiée est par exemple lognormale ou est une indicatrice, la covariance doit satisfaire des conditions supplémentaires.

L'ajustement du variogramme

L'ajustement d'un variogramme expérimental à un modèle est un domaine auquel je n'ai pas apporté de contribution particulière dans le cas stationnaire. La section 2.6 présente les différentes approches manuelles et automatiques disponibles en l'absence de dérive et fait le lien avec des approches moins connues des géostatisticiens comme l'approche spectrale. Par contre j'ai largement contribué aux méthodes développées pour le cas non stationnaire. L'exemple introductif (sec. 2.7) avait été élaboré pour une école d'été du Centre de géostatistique, sous une forme à peine simplifiée. J'ai également contribué, en collaboration avec Pierre Chauvet, aux travaux de recherche sur le variogramme des résidus, qui ont conduit au développement du modèle des FAI- k . Souvent on peut se ramener à des modèles plus simples, comme ceux qui ont été adoptés pour la topographie du secteur de Noirétable et la microgravimétrie d'une carrière qui sont présentés ici et que j'ai tous deux traités.

Théorie de l'estimation et de la fluctuation du variogramme

Après une présentation d'applications simples, et encore souvent utilisées, le chapitre se termine par la théorie de l'estimation et de la fluctuation du variogramme. Les formules

générales sont dues à G. Matheron. Elles avaient fait l'objet d'une évaluation numérique, parfois approximative, par M. Alfaro. Les calculs ont été refaits et élargis. Ne sont pas présentés les résultats similaires (théorie et calcul) que j'ai obtenus pour des variogrammes généralisés.

1.3. LE KRIGEAGE

Théorie

Une fois connu le variogramme, il est possible de calculer la variance d'estimation associée à tout estimateur linéaire, et de plus de déterminer les pondérateurs qui conduisent à la variance d'estimation minimale tout en assurant une absence de biais : c'est le krigeage. Les principes en sont bien connus. La théorie se développe d'abord dans un monde idéal où moyenne et covariance sont connues ; le krigeage simple jouit alors de nombre de bonnes propriétés : orthogonalité de l'estimateur et de l'erreur d'estimation, non biais conditionnel, identité avec l'espérance conditionnelle dans le cas gaussien. Avec le krigeage ordinaire et le krigeage universel elle se généralise à des cas où la moyenne n'est plus connue, au prix toutefois d'une perte de certaines bonnes propriétés du krigeage simple.

Mise en œuvre

La théorie est développée en voisinage unique, ce qui en pratique suppose une homogénéité spatiale des caractéristiques structurales et un nombre de données limité (même si actuellement on peut sans problème résoudre le système de krigeage pour un millier de données). La réalité est bien sûr beaucoup plus diverse. Ma contribution concerne des développements particuliers pour la mise en œuvre du krigeage dans des logiciels comme BLUEPACK à l'Ecole des mines ou GDM au BRGM : algorithmes performants (en qualité) de recherche de voisinage quels que soient le nombre et la configuration des données (régulière, en salves, sur profils), prise en compte d'erreurs de mesures corrélées le long de profils, ou d'erreurs de localisation (mesures en mer, levés aéroportés), prise en compte de discontinuités ou de failles, évolution spatiale des paramètres structuraux.

Validation : l'exemple du tunnel sous la Manche

Ma contribution concerne également un grand nombre d'applications pratiques, parmi lesquelles l'étude réalisée pour le tunnel sous la Manche (section 3.8) constitue un cas exemplaire de mise en œuvre du krigeage et de validation de la démarche géostatistique. En effet l'objectif était de fournir un modèle géologique assorti d'une fourchette d'incertitude ; pour simplifier, fournir la carte de la profondeur du toit des argiles du Gault et l'écart-type d'estimation correspondant. Ces résultats servaient alors de base à la conception en 3D du tracé du tunnel de façon à ce que ses trois galeries se maintiennent dans la couche de craie bleue qui surmonte ces argiles. Il est parfois de bon ton de dire que les écarts-types de krigeage ne sont que des indicateurs des configurations de krigeage et ne permettent pas de fournir d'intervalles de confiance fiables. Cette étude montre qu'au contraire on peut s'appuyer sur les résultats géostatistiques, pourvu bien évidemment qu'on effectue une analyse structurale soignée : covariance localement stationnaire car une zone où 100000 données ont été mesurées n'est pas spatialement homogène, prise en compte des diverses sources d'incertitude et d'erreur de mesure affectant les données (forages anciens mal

localisés, incertitude de localisation des profils de mesure en mer, influence de la marée), validation des paramètres. En effet d'une part les prédictions (valeur prédite et écart-type) ont été confirmées par les mesures réalisées au fur et à mesure de l'avancement du chantier ; d'autre part le creusement a pu être maintenu dans la couche géologique la plus favorable (la craie bleue) malgré sa relativement faible épaisseur, ce qui a permis sa réalisation dans un délai plus court que celui qui était prévu.

1.4. LE MODELE INTRINSEQUE D'ORDRE k

Théorie

Ce modèle est d'abord important d'un point de vue théorique. En travaillant sur des classes d'équivalence de fonctions aléatoires, il permet de bien différencier les propriétés intrinsèques, qui sont accessibles expérimentalement, de celles qui restent en général indéterminées. Ce cadre conceptuel permet également d'élargir le champ des modèles disponibles, de préciser ce qui doit et peut être identifié du variogramme ou de la covariance généralisée en présence d'une dérive. C'est également le cadre adapté à la résolution d'équations aux dérivées partielles stochastiques. Pierre Delfiner a su remarquablement synthétiser cette théorie, dont les fondements sont constitués de notes et d'articles souvent arides, sans pour autant la dénaturer.

Inférence statistique

L'adaptation du krigeage au cadre des FAI- k est immédiate. Par contre le point délicat est celui de l'inférence statistique de la covariance généralisée. C'est dans ce domaine que se situe ma contribution initiale à la géostatistique. Dans le cas de données à implantation non régulière, on doit se résoudre à des méthodes de type boîte noire. Avec Pierre Chauvet nous avons développé pour le logiciel KRIGEPACK une méthode d'analyse structurale automatique très semblable à celle qui a été développée par Pierre Delfiner pour BLUEPACK (section 4.8). J'ai ultérieurement développé la méthodologie de l'inférence statistique à l'aide du variogramme généralisé, qui permet une approche plus semblable à l'inférence du variogramme ordinaire lorsque l'on dispose de données à maille régulière à 2D ou le long de profils. Ces travaux, initiés à Fontainebleau, ont été complétés au BRGM où ils ont fait l'objet d'applications en géothermie et en analyse de la topographie de fractures (section 4.7). Ils confirment en particulier l'identité pratique entre modèle du krigeage universel et FAI- k lorsque la covariance généralisée se ramène, au signe près, à un variogramme.

1.5. LES METHODES MULTIVARIABLES

Théorie

Au départ, les méthodes multivariées servaient à caractériser le lien entre deux ou plusieurs variables analysées, par exemple les teneurs en Pb et Zn dans un gisement. Avec le développement des méthodes de mesure indirectes (radiométrie, télédétection par exemple), elles ont connu un développement spectaculaire pour tirer le meilleur parti possible de toutes les informations secondaires disponibles.

Au-delà des principes généraux, les développements sont très variés, à l'image des types d'information secondaire. Aussi ma contribution ne concerne-t-elle que quelques aspects particuliers : la prise en compte de données de gradient (le vent en météorologie, cf. section 5.5.1, ou récemment la prise en compte de données structurales en modélisation géologique), la représentation de la topographie des deux épontes d'une fracture (sec. 5.6.1 et 5.6.2), l'interprétation physique de données hydrothermales dans la croûte océanique, qui permettent de caractériser le type de transfert de chaleur (convectif ou conductif ; sec. 5.6.3), la séparation d'une anomalie de Bouguer en anomalie régionale et anomalie locale par krigeage factoriel avec une modélisation qui recourt à des modèles adaptés à la gravimétrie (sec. 5.6.6), ainsi que des applications des raccourcis que constituent le "guess field" (météorologie) et la dérive externe (géothermie).

Si la théorie du cokrigeage apparaît comme une généralisation immédiate du krigeage, un point qui est rarement mentionné est sa moindre robustesse. On sait que si le palier d'un variogramme est mal fixé, ceci n'a aucune conséquence sur l'estimateur de krigeage et va simplement affecter les variances de krigeage. Dans le cas du cokrigeage, ceci reste vrai seulement si l'incertitude sur le modèle touche l'ensemble des structures directes et croisées dans les mêmes proportions. Dans le cas contraire, l'estimateur de cokrigeage est affecté, et parfois gravement : les pondérateurs associés aux variables auxiliaires seront par exemple exagérés si la variance de ces variables a été sous-évaluée. Dans les applications il est donc nécessaire de s'assurer des modèles choisis. Revenons dans cet esprit sur les exemples que j'ai eus à travailler.

Prise en compte de données de gradient

En météorologie, le vent géostrophique est à une rotation près le gradient du géopotentiel ou du champ de pression. Les covariances des composantes du vent et les covariances croisées entre ces composantes et le géopotentiel se déduisent immédiatement des dérivées du variogramme du géopotentiel. Ces propriétés sont mises à profit pour réaliser une analyse structurale conjointe des deux types de données. C'est particulièrement nécessaire car les données de gradient apportent une information importante sur la variabilité du géopotentiel aux petites distances, qu'on n'obtient pas à partir des seules données de géopotentiel, beaucoup trop distantes. C'est ce qui permet d'effectuer ensuite un cokrigeage qui ait du sens (cf. la figure 5.3).

Représentation de la topographie des épontes d'une fracture

L'étude de l'écoulement au sein d'une fracture dont les épontes sont en contact demande une représentation fine de la rugosité des épontes, des zones de contact et de la hauteur des vides. Le variogramme de la hauteur des vides découle des variogrammes directs et croisé des topographies des épontes. Un modèle simple est celui d'épontes semblables mais affectées d'un déplacement relatif. Il permet de rendre compte de failles et de joints stylolithiques. Nous reviendrons sur ce point au chapitre suivant.

Géothermie et transfert de chaleur

Dans les zones de subduction les transferts de chaleur dans la croûte océanique peuvent s'effectuer selon un régime conductif ou convectif. Du fait de la réfraction thermique, un régime conductif est associé à de forts transferts de chaleur dans les eaux profondes et de

faibles transferts dans les eaux peu profondes, donc à une corrélation négative entre profondeur de l'océan et flux de chaleur. Un régime convectif (entrée d'eau froide dans les fonds des zones profondes, puis percolation et réchauffement dans les couches de sédiments jusqu'aux fonds peu profonds) produit l'effet contraire. Le calcul brutal de la corrélation expérimentale entre les deux variables donne des résultats mitigés, car les données de flux sont affectées d'un effet de pépité assez important. Une analyse soignée permet de filtrer l'influence de cet effet de pépité et de montrer de façon beaucoup plus probante que certaines zones fonctionnent en régime convectif, et d'autres en régime conductif.

Analyse krigéante de données gravimétriques

L'utilisation de l'analyse krigéante est un autre cas très particulier de traitement multivariable. La donnée est en effet une variable unique, l'anomalie de Bouguer, qu'on cherche à décomposer en une anomalie régionale et une anomalie locale. Une telle décomposition comporte une part d'arbitraire si elle n'est pas guidée par des considérations physiques. Dans le cas présent (la Bresse), les structures responsables de l'anomalie de Bouguer sont les variations de la base du Tertiaire aux alentours de 2.5 km et de la base du Secondaire aux alentours de 6 km de profondeur. Ceci signifie que le variogramme doit être la somme de deux composantes (des modèles de Cauchy de paramètre de forme $\alpha = 1/2$) et de portées (horizontales) 5 km et 12 km (le double des profondeurs des sources). C'est sous cette contrainte qu'est fait l'ajustement de la figure 5.9, qui permet alors d'estimer séparément chacune des composantes par un cokrigeage qui ait du sens. L'étude montre également la similitude de l'analyse krigéante avec l'approche spectrale et sa plus grande flexibilité.

1.6. LES METHODES NON LINEAIRES

La géostatistique non linéaire constitue la partie la plus rébarbative de la géostatistique. D'abord elle est fortement marquée par l'origine minière des problèmes qu'elle cherche à résoudre. Ainsi prédire les réserves récupérables d'un gisement en fonction de la taille du support de sélection (effet de support) et de la maille de sondage de préexploitation (effet d'information) peut sembler un problème trop spécifique pour un tel ouvrage. Pourtant la problématique se retrouve dans d'autres domaines, avec une moindre acuité toutefois en ce qui concerne l'effet d'information. Ainsi en est-il dans les problèmes de pollution, où on s'intéresse au risque de dépassement d'un seuil, soit ponctuellement (dans l'espace ou le temps), soit au niveau de sa valeur moyenne dans un intervalle de temps fixé ou dans une zone donnée.

La seconde difficulté tient à la complexité de l'arsenal théorique qui entoure les modèles isofactoriels et le krigeage disjonctif par rapport à celui de la géostatistique linéaire. Une troisième difficulté tient aux approximations que requiert sa mise en oeuvre, qu'il faut savoir maîtriser.

La tentation est grande dans ce cas de se cantonner aux méthodes éprouvées de la géostatistique linéaire, malgré leurs limitations, ou de réaliser un krigeage disjonctif standard comme le krigeage disjonctif bigaussien, avec comme conséquence que la méthode perd toute optimalité si les données n'ont pas le bon goût de se conformer à un modèle bigaussien.

Le chapitre, rédigé pendant et après la direction de la thèse de Hong-Tao Liao (1990), poursuit deux objectifs :

- présenter ce qui peut être fait avec les méthodes classiques, soit dans un cadre fortement spécifié (espérance conditionnelle en modèle multigaussien), soit dans un modèle se ramenant à la géostatistique linéaire mono ou multivariable ;
- présenter le krigeage disjonctif et les modèles isofactoriels assortis d'une méthodologie qui permette de démystifier leur complexité apparente et de les rendre opérationnels.

Estimation non linéaire en l'absence de changement de support

Le problème se ramène à l'estimation d'une distribution globale et surtout locale. Une première partie est consacrée aux méthodes classiques, y compris le krigeage et le cokrigeage d'indicateurs. Le premier a le mérite d'une facilité de mise en oeuvre, au prix d'un appauvrissement de l'information, tandis que le second, théoriquement optimal, présente de réelles difficultés en pratique.

Le krigeage disjonctif et les modèles isofactoriels qui permettent sa mise en oeuvre font l'objet de la section qui suit. Ici tout ou presque est dû à G. Matheron tant les prémices d'autres auteurs sont minces (développement isofactoriel de la loi de Gauss bivariable et de la loi gamma bivariable, processus de naissance et de mort ; aucun antécédent au krigeage disjonctif, qui établit un intermédiaire entre estimation linéaire et espérance conditionnelle). Ceci explique que G. Matheron y ait consacré une littérature abondante. Pour la rédaction de cette section, un travail conséquent a d'ailleurs consisté à synthétiser et ordonner sous une forme accessible ses nombreuses notes présentant une foule de modèles isofactoriels et de modèles de changement de support.

Comme je l'ai souligné, le krigeage disjonctif ne présente d'intérêt pratique que si on est capable de l'appliquer plus largement que dans le cadre d'un modèle bigaussien. Ceci suppose définis des guides méthodologiques pour sa mise en oeuvre. Ils sont présentés dans la fin de cette première partie et illustrés par un des gisements traités par H.T. Liao.

Modélisation du changement de support

La motivation réelle du développement des méthodes non linéaires est le changement de support. En effet, si les méthodes linéaires peuvent encore être employées pour un support ponctuel, elles ne sont pas à même de traiter un problème de dépassement d'une teneur de coupure ou d'un seuil de pollution pour un support non ponctuel.

La première partie présente les relations qui unissent histogrammes et plus généralement fonctions de sélectivité établis pour un support ponctuel et pour des supports non ponctuels ; notons qu'il s'agit là d'un point qui a été traité indépendamment et à la même époque en économétrie pour comparer les distributions des richesses de deux populations différentes. Sont ensuite présentées les différentes méthodes permettant de déterminer les fonctions de sélectivité globales pour un support non ponctuel.

L'estimation locale des fonctions de sélectivité se fait par krigeage disjonctif. Elle requiert des modèles isofactoriels non seulement pour les lois bivariées concernant deux points mais aussi pour deux blocs ou un bloc et un point. C'est un problème difficile auquel G. Matheron a consacré de nombreuses et parfois volumineuses notes, dont un aperçu est donné ici.

L'estimation non linéaire est donc un domaine où j'ai travaillé relativement ponctuellement mais en même temps activement, essentiellement pour la direction de la thèse de H.T. Liao dont l'objectif était de comparer sur des applications réelles les qualités respectives des deux principales méthodes proposées, alors au centre de bien des controverses, à savoir le krigeage disjonctif et le cokrigeage d'indicateurs. Le chapitre se termine sur les enseignements tirés de cette thèse et de la bibliographie.

1.7. LES SIMULATIONS CONDITIONNELLES

C'est le chapitre le plus développé de l'ouvrage, et ceci tient à plusieurs raisons : d'abord – ce n'est pas un argument scientifique mais cela compte – c'est sans doute l'aspect de la géostatistique qui m'a le plus fasciné. Ensuite c'est un domaine en fort développement depuis une vingtaine d'années, les possibilités informatiques aidant. Enfin il y avait un besoin évident puisque aucun ouvrage de géostatistique ne leur consacrait plus d'une dizaine de pages (je fais abstraction bien sûr des recueils d'articles, ainsi que de l'ouvrage de synthèse de C. Lantuéjoul sur les simulations qui est sorti en 2002).

Dans ce domaine très large, les contributions sont nombreuses et variées, compte tenu de l'extrême diversité des besoins, depuis la simulation d'une variable continue jusqu'à des simulations de faciès en passant par la prise en compte de variables auxiliaires géophysiques ou de contraintes comme des historiques de production. Grande diversité aussi des données, en nombre comme en qualité. Aussi ce chapitre présente-t-il un assez large éventail de méthodes, en précisant leurs avantages et leurs limites, de façon à permettre un choix en fonction du problème posé. J'ai d'ailleurs mis en œuvre plusieurs de ces méthodes dans divers logiciels au gré des besoins (sans compter bien sûr des développements dans un seul but de recherche ou pour réaliser les illustrations de cet ouvrage).

Importance de la loi spatiale

À l'époque du début des simulations conditionnelles, on insistait surtout sur la reproduction de l'histogramme et de la covariance. Mais en fait on faisait l'hypothèse implicite qu'à une anamorphose près (destinée à reproduire l'histogramme) il était légitime de recourir à un modèle (multi)gaussien. J'insiste ici dès le début sur le fait que l'histogramme et la covariance sont loin de caractériser une fonction aléatoire, en présentant dix simulations très différentes qui ont pourtant toutes même covariance et dont plusieurs ont de plus le même histogramme. Il faut être conscient que lorsqu'on choisit une méthode de construction de simulations, on choisit une loi spatiale.

Simulation d'une variable continue

Les méthodes disponibles peuvent permettre de construire des simulations non gaussiennes mais on est loin de contrôler leur loi spatiale, surtout dans le cas de simulations conditionnelles. Aussi en pratique servent-elles à construire des simulations à loi spatiale gaussienne ou asymptotiquement gaussienne (c'est-à-dire en moyennant l'effet d'un grand nombre de simulations indépendantes). A l'exception notable de la méthode séquentielle gaussienne, la conditionnalisation aux données n'est pas réalisée directement mais dans une étape ultérieure par l'intermédiaire du classique repiquage des résidus sur le krigeage. Quant au respect de l'histogramme il est assuré par l'intermédiaire d'une anamorphose.

Certaines méthodes ne sont guère praticables qu'à 1D mais peuvent servir à 2D ou 3D par le recours à la méthode des bandes tournantes. Aussi bon nombre de méthodes de base sont présentées : dilution de germes poissonniens ou méthode spectrale continue pour des simulations en des points quelconques, processus autorégressifs, moyennes mobiles et méthode spectrale discrète pour des simulations aux noeuds d'une grille régulière, sans compter des variantes.

Je soulignerai en particulier la méthode de construction rigoureuse des simulations spectrales discrètes, mise au point en commun par P. Delfiner et moi-même. Il nous est apparu en effet, en rédigeant cette partie, que les auteurs antérieurs faisaient une application approximative d'un algorithme qui pouvait être exact, ou méconnaissaient les limites de l'algorithme et les moyens de les circonvenir.

Simulation de FAI- k

Plusieurs des méthodes précédentes, développées pour des fonctions aléatoires stationnaires, se généralisent à des fonctions aléatoires intrinsèques, voire à des FAI- k . C'est un domaine auquel j'ai contribué très tôt : simulation d'un variogramme linéaire à partir de droites poissonniennes lors du stage de 3^e année à l'Ecole des mines (en collaboration avec P. Chauvet), élaboration d'un logiciel de simulations conditionnelles non stationnaires et applications dans le domaine pétrolier (en collaboration avec J.P. Delhomme).

Plus récemment, en rédigeant ce chapitre, j'ai exploité la méthode spectrale discrète pour mettre au point une méthode simple et rigoureuse de simulation du mouvement brownien fractionnaire à une dimension, qui se généralise avec une très bonne approximation à n dimensions. Malgré l'abondance de la littérature fractale, je n'y avais trouvé que des solutions partielles ainsi que plusieurs solutions approchées et souvent plus qu'approximatives. Signalons quand même une solution correcte à 1D, mais de mise en oeuvre complexe, dans le domaine des ondelettes.

Simulation d'une variable catégorielle

Un grand nombre d'applications s'intéressent à des variables catégorielles : fonction indicatrice, faciès lithologiques, etc. Je présente les trois grandes approches du problème :

- la simulation séquentielle d'indicatrices, qui repose seulement sur les covariances des indicatrices et dont la loi spatiale n'est pas connue ;
- la méthode des gaussiennes seuillées, où les indicatrices ou les lithologies sont déduites de variables continues sous-jacentes ;
- les méthodes à objets, dont le prototype est le modèle booléen.

La première permet d'engendrer directement des simulations conditionnelles. Pour les autres, les méthodes de conditionnalisation font appel à des algorithmes itératifs qui paraissent maintenant naturels alors qu'il n'en était rien dans un passé pas si lointain.

Je présente également plusieurs méthodes d'intérêt plus local comme les partitions aléatoires (qui permettent de simuler des lois mosaïques) et les fonctions aléatoires de substitution (qui permettent notamment de simuler des processus de diffusion dans \mathbb{R}^n à partir de simulations

dans \mathbb{R}), ainsi que des méthodes comme le recuit simulé qui permettent de contraindre des simulations.

Applications

Le chapitre se termine par deux applications concernant l'une la mine et des variables continues, la puissance et la teneur moyenne des différentes catégories de minerai d'un gisement de nickel (étude réalisée au BRGM), l'autre le pétrole et des simulations de faciès lithologiques (le premier exemple publié par l'équipe HERESIM).

1.8. EFFET D'ECHELLE ET METHODES INVERSEES

Une limitation d'une approche purement statistique est son aspect descriptif : on élabore un modèle qui rend compte d'une distribution d'observations sans élaborer de loi physique. Or lorsqu'on étudie plusieurs variables, celles-ci sont souvent liées par des équations traduisant des lois physiques. Les modèles stochastiques que nous utilisons doivent respecter ces équations, sous peine d'incohérences dans les conséquences que nous en tirons. Quelques cas particuliers très simples ont été examinés au chapitre des méthodes multivariées, comme la relation entre la covariance d'une variable différentiable et celle de son gradient.

Le présent chapitre considère le cas plus général de variables liées par des équations aux dérivées partielles. G. Matheron s'étant intéressé à ce problème depuis fort longtemps alors que je n'en avais aucune expérience, il avait accepté d'écrire ce chapitre. J'ai dû finalement m'en charger. Heureusement, entre temps j'avais eu l'occasion de m'y consacrer en encadrant la thèse de Chris Roth (1995) sur des approches géostatistiques de l'inversion en hydrogéologie. Ce chapitre est donc fortement marqué par la façon dont le problème est traité en hydrogéologie, avec l'espoir que le lecteur saura transposer à sa propre discipline.

En dehors de généralités sur les équations aux dérivées partielles stochastiques, ce chapitre repose principalement sur les apports de G. Matheron au changement d'échelle des perméabilités, qui restent la référence après plus de trente années, et sur une synthèse des 40 années de recherche et de pratique de l'inversion stochastique des hydrogéologues, qui avec les géophysiciens ont sans doute la plus longue expérience de ces méthodes (de Marsily, Neuman, Rubin, Dagan, Gelhar, Gutjahr, Kitanidis, Gómez-Hernández, pour n'en citer que quelques uns).. Ma petite contribution est liée à l'encadrement de la thèse de C. Roth, dont les travaux émaillent la section 8.4 et la fin de la section 8.2. Je rappelle ci-après les trois points principaux qui avaient été examinés.

Calcul analytique des covariances de la charge et de la transmissivité

Le calcul analytique des covariances directes et croisée n'est possible que moyennant quelques hypothèses simplificatrices : transmissivité lognormale, écoulement unidirectionnel, absence de recharge (ou sinon une variance limitée de la transmissivité) ; il avait été réalisé pour des conditions aux limites rejetées à l'infini. Ici on examine le cas de conditions aux limites à distance finie, dans la configuration classique de limites rectangulaires, avec deux faces à charge constante et deux faces imperméables. Le calcul passe par une périodisation adaptée du problème, suggérée par G. Matheron, et des transformées de Fourier. Le cas de limites rectangulaires est ensuite généralisé à des géométries plus réalistes par transformation conforme.

Calcul numérique des covariances de la charge et de la transmissivité

Les situations concrètes ne se laissent pas toujours ramener aux cas simples où on peut mener des calculs analytiques : conditions aux limites plus complexes ou connues seulement en partie, transmissivité non lognormale ou trop variable, recharge non constante, etc. Une approche consiste alors à exploiter la physique du phénomène telle qu'elle est intégrée dans les codes de calcul d'écoulement par différences finies ou éléments finis : on engendre une série de simulations de la transmissivité, on calcule la charge hydraulique correspondant à chaque simulation à l'aide de ce code, et on en déduit numériquement les moyennes et covariances directes et croisées de la charge et de la transmissivité entre tout couple de points. Ces covariances numériques sont bien des covariances, en ce sens que la matrice de covariance associée est par construction de type positif. On peut donc les exploiter pour un cokrigeage. Bien entendu, ces covariances ne reflètent les covariances théoriques avec une approximation satisfaisante que si elles sont calculées à partir d'un grand nombre de simulations.

Changement d'échelle

Le changement d'échelle pour passer de perméabilités ponctuelles aux perméabilités de passage utilisées par les logiciels de calcul par différences finies est un point assez technique, mais qui devait être examiné dès lors qu'on cherche à modéliser finement les covariances.

Ces travaux présentent un double intérêt :

- ils permettent d'exploiter les données de piézométrie lors de la détermination de la covariance de la transmissivité, et donc de choisir un modèle qui soit cohérent avec les données de transmissivité et les données de charge ;
- ils permettent dans les cas simples de ramener le problème inverse à un cokrigeage ou à des cosimulations conditionnelles.

Les méthodes plus lourdes (points pilotes par exemple) restent nécessaires pour les cas plus complexes, notamment pour les aquifères qui présentent de forts contrastes de perméabilité.

CHAPITRE 2

Modélisation stochastique des milieux fracturés

Plus l'artiste se penche avec impartialité vers le détail, plus l'anarchie augmente.

Baudelaire, *Le Peintre de la vie moderne*

2.1. INTRODUCTION

Mes premières recherches sur la modélisation stochastique des milieux fracturés remontent aux années 80. A cette époque elles étaient motivées par l'étude de l'aptitude de sites géologiques au confinement de déchets nucléaires. Nombre de sites envisagés alors concernaient des granites peu fracturés. Dans des milieux à matrice imperméable ou peu perméable, comme c'est le cas pour les granites, les écoulements se font principalement par le réseau des fractures. Pour se ramener à l'approche hydrogéologique classique, il fallait déterminer l'échelle au-delà de laquelle le milieu pouvait être considéré comme équivalent à un milieu continu, et déterminer sa perméabilité équivalente. Mais encore fallait-il montrer que cette échelle existait (était finie), et dans le cas contraire proposer un autre type de modélisation hydrogéologique.

L'approche retenue consistait à représenter de façon aussi fidèle que possible la géométrie du réseau de fractures, puis la géométrie des fractures individuelles, enfin à passer à l'étude de l'écoulement et du transport au niveau d'une fracture puis du réseau. Ce travail ne peut être fait qu'au sein d'une équipe pluridisciplinaire comprenant géologue structuraliste, hydrogéologue spécialisé en milieux fracturés, mécanicien des roches, géostatisticien. C'était le cas à cette époque : les débuts ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration entre Jean-Louis Blès et Yves Gros pour la géologie structurale, Bernard Feuga pour la géotechnique, Raymonde Blanchin et moi-même pour la géostatistique ; leur portée était limitée car les données n'avaient pas été collectées en fonction des besoins d'une approche géostatistique. La méthode de levé des fractures fut rapidement améliorée ; la démarche de modélisation fut alors mise au point pour l'étude de sites granitiques, notamment dans le cadre d'une collaboration avec l'équipe de Jane Long au Lawrence Berkeley Laboratory, et fut aussi appliquée à des gneiss. Au BRGM ces travaux ont donné lieu à deux thèses couplant géologie structurale et géostatistique, l'une dans le granite (Hamid Massoud, 1987), l'autre dans les gneiss (Philippe Loiseau, 1987), ainsi qu'à plusieurs articles et communications, souvent en commun avec l'équipe de Berkeley. Je l'ai synthétisée dans la première partie d'un chapitre d'un ouvrage collectif consacré aux milieux fracturés. La seconde partie de ce chapitre, rédigée par Ghislain de Marsily, présente l'utilisation des modèles stochastiques de

réseau de fractures pour la modélisation de l'écoulement et du transport. Ce chapitre est annexé au présent document et je me contenterai dans la Section 2.2 d'en présenter les grandes lignes. L'ensemble de la démarche, de la géologie structurale à l'écoulement et au transport, se trouve ramassé dans la thèse de Daniel Billaux (1990).

Dans les milieux stratifiés, les fractures subverticales s'arrêtent souvent sur des interbanes et le modèle des disques aléatoires développé pour les granites n'est pas approprié. Aussi d'autres modèles ont-ils été développés ultérieurement, d'abord pour les carrières marbrières de Comblanchien (thèse de Fabrice Gervais, 1993, dirigée par Sylvie Gentier), puis pour des sites considérés comme des analogues de réservoirs pétroliers fracturés. Ces derniers travaux ont été réalisés pour une bonne part dans le cadre de projets européens, avec pour partenaires le Fault Analysis Group de Liverpool (aujourd'hui à Dublin) et plus particulièrement John Walsh et Paul Gillespie, Noelle Odling alors au NERSC (Norvège), le Service géologique du Danemark, et bien sûr des pétroliers. Ils ont été permis côté Groupe BRGM par la collaboration de Christian Castaing et Albert Genter pour la géologie structurale, d'Eric Fillion, Jacques Wendling puis Pascal Siegel pour l'hydrogéologie, de Bernard Bourguin et moi-même côté géostatistique. Un analogue a fait l'objet d'études détaillées : les grès du Saq en Arabie. Une étude multiéchelle a montré des échelles caractéristiques liées à l'épaisseur des différentes unités mécaniques (thèse de Guy Ouillon, 1995, en particulier). La fracturation d'échelle pluridécamétrique a fait l'objet d'un modèle, avec comme objectif final d'examiner à quelles conditions le massif pouvait à cette échelle être représenté par un milieu continu équivalent. L'ensemble de la démarche, de la géologie structurale à l'hydrogéologie en passant par la géostatistique, est synthétisé dans deux articles annexés à ce mémoire (Chilès et al., 2000 ; Castaing et al., 2002).

2.2. MODÉLISATION D'UN RESEAU DE FRACTURES : DEMARCHE GENERALE

Il existe deux grands types de modélisation : (1) celle qui simule le processus de fracturation, et engendre ainsi le réseau des fractures ; (2) celle qui se contente de reproduire statistiquement la géométrie du réseau et des fractures dans un état donné. La première approche est bien sûr plus séduisante, car elle permet de représenter l'évolution passée du massif et surtout de simuler son évolution future en fonction des sollicitations qu'il pourrait subir. Cette approche demande en revanche beaucoup d'informations : lois d'évolution des fractures en fonction des contraintes géomécaniques et de la rhéologie du matériau, représentation des hétérogénéités de la roche, historique des contraintes subies par le massif, etc. Nous nous contentons ici d'une modélisation statique du milieu fracturé au moyen de modèles stochastiques.

L'approche la plus courante, et qui paraît naturelle, consiste à représenter le milieu fracturé par une collection d'objets, les fractures, et à étudier séparément la modélisation du réseau et la modélisation de la forme exacte de chaque fracture. Précisons que le terme fracture est employé ici comme un terme générique, au sens de discontinuité d'origine mécanique et tectonique : en simplifiant il recouvre d'une part les joints et diaclases, discontinuités qui se sont créées sous l'effet d'une traction, sans trace de mouvement relatif des deux compartiments, et les failles, dont la création s'est accompagnée d'un déplacement sous l'effet d'un cisaillement.

Dans la modélisation du réseau, on ne se préoccupe pas encore de la morphologie et de la rugosité des fractures, qui peuvent être assez différentes selon le type de fracture et selon le

matériau ; chaque fracture est considérée comme une surface de discontinuité plane, de forme elliptique ou polygonale. Par contre on cherche à représenter le plus fidèlement possible l'agencement des fractures, notamment leur connectivité qui conditionne aussi bien la perméabilité au sein du réseau (calculs d'écoulement) que la délimitation de blocs (calculs de stabilité). Il est aisé d'imaginer des modèles très simples de réseaux comme les disques aléatoires ou les plans poissoniens. La confrontation à des situations réelles exige toutefois des modèles plus généraux. Ceux-ci sont conçus et développés sur des exemples bien affleurants permettant un relevé bidimensionnel précis des traces des fractures. La démarche est alors la suivante :

- conception d'un modèle stochastique tridimensionnel permettant de rendre compte du réseau bidimensionnel observé et de considérations structurales concernant la troisième dimension ; le modèle ne doit pas nécessairement représenter tout le détail de ce qui pourrait être observé, mais il doit bien représenter la topologie du réseau, c'est-à-dire la connectivité des fractures ;
- développement d'une méthodologie d'identification des paramètres du modèle à partir des données disponibles : c'est une tâche qui est souvent éludée car elle n'est pas évidente et peut être pour partie un problème "mal posé", mais il est important d'avoir des réponses autres que de simples procédures d'essai-erreur ;
- élaboration d'une méthode de simulation du réseau, conditionnelle ou non à des observations : la conditionnalisation est souvent indispensable et n'est pas toujours un problème simple.

Dans une application à un site profond (stockage, exploitation pétrolière, géothermie haute énergie), le réseau n'est pas observable sur des affleurements mais seulement à une dimension le long de forages (interprétation d'imagerie de paroi ou relevé sur carottes). Le choix du type d'organisation du réseau est alors effectué sur la base des éléments qu'apportent ces observations ainsi que de l'étude de sites bien affleurants présentant avec le site étudié une bonne analogie du point de vue du matériau et du contexte géodynamique. Les paramètres obtenus sur un analogue sont recalés en fonction des observations en forage sur le site étudié et de considérations géomécaniques.

2.3. MODÉLISATION DE LA PETITE FRACTURATION DANS LES GRANITES (Chilès et de Marsily, 1993)

La méthodologie a été établie à partir de l'étude du granite de la mine de Fanay-Augères. Cette mine avait été choisie pour ses facilités d'accès et non pas pour son aptitude au confinement : elle est beaucoup trop fracturée pour cela. Plusieurs stations ont fait l'objet d'un relevé détaillé de toutes les fractures naturelles observables. Toutes ? C'était l'objectif, mais il est permis de douter qu'il ait été atteint. Les stations étaient en effet des parois de galerie. Et en souterrain, dans des zones mal éclairées, on repère plus facilement les fractures qui se trouvent à hauteur du regard que celles qui sont à ses pieds. C'est sans doute l'explication du fait que deux fois plus de fractures aient été observées à 1.60 m qu'à 40 cm du sol. Une cause de biais parmi bien d'autres.

Étude statistique des fractures (Section 4.4)

Les fractures se répartissent généralement en plusieurs familles directionnelles qui se sont créées puis ont pu jouer au gré des divers événements tectoniques qui ont affecté le massif considéré. Chaque famille présente des caractéristiques statistiques propres, en termes de distribution des orientations, de la taille, de l'ouverture, du type de terminaison, etc. Avant d'entreprendre une étude géostatistique, une première tâche est donc d'identifier ces familles, en s'appuyant sur l'histoire structurale du massif, et de déterminer les caractéristiques statistiques des principaux paramètres des fractures individuelles.

Les statistiques brutes peuvent donner une image complètement erronée de la réalité car les relevés de fractures sont affectés par une série de biais qui touchent différemment les diverses familles de fractures. Il importe donc de répertorier ces biais et de les réduire. La plupart des biais sont de nature stéréologique et géométrique : on s'intéresse aux caractéristiques d'une population d'un espace tridimensionnel alors qu'on dispose au mieux de données acquises en 2D sur des affleurements de taille limitée, et souvent seulement de données acquises le long de forages. Les biais qui en résultent sont principalement :

- *Le biais lié à l'orientation de la fracture par rapport à celle du support de mesure* : Les fractures obliques par rapport à l'affleurement ou au forage sont sous-représentées par rapport à celles qui leur sont orthogonales. La correction est aisée pour un support de mesure et des fractures parfaitement planes et des mesures d'orientation exactes, ce qui n'est bien sûr jamais le cas en pratique.
- *Le biais lié à l'extension des fractures* : Les grandes fractures sont surreprésentées par rapport aux petites ; en d'autres termes, l'histogramme observé est un histogramme en mesure et non un histogramme en nombre.
- *D'autres sources de biais* affectent plus particulièrement la taille des fractures : D'abord on accède au mieux à la longueur des traces observées sur affleurement ; pour remonter à la loi des tailles des fractures, il faut se donner leur forme (par exemple des disques) et faire appel aux relations stéréologiques entre paramètres des fractures et paramètres des traces. D'autre part il faut tenir compte du fait que les traces les plus courtes ne sont pas relevées, et que les traces longues ne sont souvent visibles que partiellement. Ces problèmes, en apparence simples, font souvent partie de la catégorie des problèmes "mal posés".

Tous ces points sont traités en détail dans la Section 4.4.

Modèle booléen à disques aléatoires (Sections 4.7 à 4.10)

Les sections 4.5 et 4.6 présentent quelques modèles stochastiques de base, ainsi qu'une tentative – au résultat mitigé – de recours à un modèle fractal. Lorsqu'une fracture naturelle se développe sans être entravée par une limite de banc ou d'autres fractures, sa forme est souvent circulaire ou elliptique. Aussi un des modèles les plus simples est-il le modèle booléen à disques aléatoires. C'est celui qui paraît le plus apte à représenter la petite fracturation dans un site granitique comme celui de Fanay. Dans ce modèle, chaque famille est constituée de disques qui sont centrés sur des points implantés au hasard et dont les caractéristiques (orientation, diamètre, ouverture) sont tirées indépendamment d'un disque à l'autre.

L'examen des relevés de fractures aussi bien que des outils géostatistiques très simples (variogramme de l'intensité de fracturation expérimentale ou de l'espacement apparent des fractures) montrent une variabilité spatiale de l'intensité de fracturation qui n'est pas compatible avec un modèle booléen de base. Pour que le modèle puisse rendre compte de la complexité du réseau réel, il a fallu le généraliser à des salves de fractures et à une régionalisation de l'intensité de fracturation. On sait qu'il n'est pas aisé de départager ces deux modes de généralisation. Comme le montre la Section 4.8, on y parvient si on leur assigne des échelles très différentes : les salves sont supposées peu dispersées (quelques mètres) et les variations spatiales de l'intensité de fracturation sont supposées lentes (portée pluridécamétrique).

Outre les caractéristiques statistiques des fractures individuelles, les paramètres de ce modèle incluent pour chaque famille la moyenne et le variogramme de l'intensité de fracturation ainsi que le nombre de fractures par salve et leur dispersion. Les éléments théoriques permettant une identification des paramètres de ce modèle ont été développés principalement lors d'un de mes deux séjours à Berkeley (deux mois et demi au total) dans le cadre d'une coopération entre le LBL et le BRGM. Les résultats obtenus ont immédiatement fait l'objet d'applications au LBL (Ph.D. de Kevin Hestir) et au BRGM (thèse de Hamid Massoud).

Les travaux méthodologiques ont été poursuivis au BRGM pour développer des algorithmes permettant de construire des simulations conditionnées par des observations en forage ou sur les parois de galeries (Section 4.9). Cette méthode a été appliquée lors d'une simulation d'un secteur du site de Stripa en Suède conditionnée par les fractures relevées sur les parois et le toit d'une galerie d'observation (Chilès et al., 1992). Les simulations servaient à caler la distribution des conductivités hydrauliques des fractures à partir des résultats de tests hydrauliques, et on a observé dans cette application que l'incertitude sur les conductivités hydrauliques était réduite d'un facteur 2 si on effectuait le calage sur des simulations conditionnelles plutôt que sur des simulations non conditionnelles.

Signalons que si on disposait d'affleurements de meilleure qualité que les parois de galerie de Fanay, dont la hauteur était très limitée, on pourrait aussi exploiter les possibilités offertes par les outils de morphologie mathématique (cf. l'étude pionnière de Conrad et Jacquin, 1973).

Si le modèle présenté ci-dessus a été développé pour la petite fracturation, il peut évidemment être employé à des échelles plus régionales. On dispose alors souvent d'informations auxiliaires permettant de représenter de façon déterministe l'évolution spatiale de la densité de fracturation ou de la direction des fractures en fonction du contexte géologique local. Une telle information peut aisément être prise en compte dans les modèles booléens. Ainsi Cacas et al. (1997) modélisent les joints d'extrados de réservoirs pétroliers en fonction de la direction locale d'étirement des couches sédimentaires : la direction des joints est prise parallèle à l'axe de la courbure normale locale maximum. De la même manière, si on s'intéresse à une zone située sur un anticlinal, la fracturation est plus intense au voisinage de l'axe de l'anticlinal, qui a travaillé en extension, que sur ses flancs. Le phénomène est encore plus marqué au voisinage de la plupart des grandes failles. La figure 15 montre une simulation de couloirs de fractures au voisinage de failles vues en sismique et en forage (Genter et al., 1997).

2.4. MODELISATION DE LA FRACTURATION DANS UN MILIEU STRATIFIE (Chilès et al., 2000 ; Castaing et al., 2002)

Dans les roches d'origine sédimentaire, comme les calcaires et les grès, la matrice peut avoir une faible perméabilité. Si ces roches sont fracturées, l'écoulement peut alors se trouver contrôlé par le réseau des fractures. Ces roches sont habituellement découpées par de grands joints de stratification, qui contrôlent le développement des autres familles de fractures. On obtient alors des réseaux hiérarchiques très différents du modèle booléen développé pour les granites. Cette hiérarchie est en fait double : hiérarchie de différentes échelles, et à chaque échelle contrôle des fractures subverticales par les joints de stratification. Une méthodologie d'étude d'un tel milieu a été mise au point pour les grès d'Arabie.

Étude multiéchelle

Les grès cambrio-ordoviciens du Saq (Arabie Saoudite) occupent l'Ouest de la plateforme arabe sur une épaisseur de 650 m. Ils se situent dans le contexte extensif de la Mer Rouge et sont affectés par des failles et des joints à différentes échelles. Les fractures ont fait l'objet de relevés détaillés dans des zones imbriquées couvrant sept échelles différentes, depuis l'interprétation d'images satellites jusqu'au levé de terrain en passant par l'interprétation de photographies aériennes.

L'examen des réseaux observés, conforté par des études statistiques, fait ressortir clairement des échelles de fracturation bien distinctes : les échelles globales et régionales (image satellite, photographies aériennes) expriment principalement des grabens puis des failles ; les échelles locales (photographies depuis un hélicoptère et levé de terrain) montrent les joints. Le réseau des failles et celui des joints sont très différents. Ces structures étant subverticales, les images bidimensionnelles apportent une information importante. Une étude fine, réalisée par Guy Ouillon à la suite des travaux de Fabrice Gervais et Bernard Bourguin, et combinant outils géostatistiques et outils fractals, montre l'existence de tailles caractéristiques, qui peuvent être rattachées aux différentes unités mécaniques que constituent les bancs sédimentaires, la formation des grès du Saq, le bassin sédimentaire et la croûte fragile. Il paraît donc légitime de construire un modèle du réseau de fractures à une échelle locale, pour examiner à quelles conditions le milieu peut à cette échelle être considéré comme un milieu continu équivalent.

Modèle stratifié hiérarchique

Les photographies aériennes font ressortir une famille principale, composée de fractures subparallèles, et une ou deux familles secondaires. Celles-ci sont également composées de fractures subparallèles, mais leur développement est subordonné à la première famille, puisque ces fractures s'arrêtent fréquemment en butée sur une fracture de la première famille. A l'échelle du terrain, on observe que chaque fracture est en fait un couloir de joints subparallèles, reliés par de petits joints transverses. Il ne paraît pas utile d'aller jusqu'à ce niveau de détail dans la modélisation, puisque cela n'apporte rien de plus au niveau de la connectivité du réseau. Nous avons donc développé un modèle apte à rendre compte de l'échelle supérieure.

S'agissant d'un milieu découpé en bancs par des joints de stratification, les fractures autres que ces joints sont essentiellement subverticales, de forme rectangulaire, et s'arrêtant sur des joints de stratification. La modélisation d'un banc se ramène alors à un modèle 2D.

Pour donner au modèle une flexibilité lui permettant de rendre compte de situations variées, les fractures de la première famille sont portées par des droites parallèles dont on se donne la loi des espacements. Un processus de renouvellement à deux états subdivise alors chaque droite en une séquence alternant fractures et intervalles intacts ; on se donne la loi des longueurs des fractures et la loi des longueurs des intervalles.

Les fractures d'une famille secondaire sont également portées par des droites parallèles dont on se donne la loi des espacements. Chacune de ces droites est découpée en segments par le réseau des droites de la famille principale. Chacun de ces segments est considéré par tirage au sort comme de la roche intacte ou comme une fracture ou une portion de fracture ; les fractures de la famille secondaire sont ainsi constituées d'un ou plusieurs segments successifs.

Pour les différentes lois de longueur on choisit en pratique des lois gamma, ce qui permet de rendre compte d'une organisation aussi bien très régulière que très clustérisée de la fracturation, et de conduire les calculs analytiques d'un certain nombre de paramètres auxiliaires (par exemple le pourcentage de fractures s'arrêtant en butée) à partir des paramètres du modèle. On peut ainsi obtenir une première évaluation des paramètres du modèle, pourvu que les données ne soient pas trop biaisées.

Il est aisé de passer à un modèle 3D si les fractures restent confinées à un seul banc. Il suffit alors de modéliser la succession des hauteurs des bancs, ce qui peut se faire en reproduisant une séquence observée ou par un processus de renouvellement. La simulation des fractures internes à chaque banc relève alors du modèle précédent. Il faut toutefois adapter les paramètres des différentes lois à la hauteur du banc. On observe en effet fréquemment que la longueur des fractures est proportionnelle à la hauteur des bancs ou du moins à une fonction de cette hauteur (en pratique on utilise une fonction puissance).

C'est un tel modèle qui a été utilisé pour représenter les grès du secteur de Tayma à une échelle pluridécamétrique. La construction de simulations non conditionnelles est immédiate et suffit à l'étude du comportement hydraulique à cette échelle. La construction de simulations conditionnelles serait plus délicate.

Des modèles plus simples ont été utilisés dans le cadre de l'étude de réservoirs pétroliers réels, avec toutefois une régionalisation de l'intensité de fracturation au voisinage de grandes failles (cf. Bech et al., 2001, chap. 6).

2.5. MODÉLISATION DE LA FRACTURE UNIQUE

La finalité de la modélisation d'un réseau de fractures n'est pas le réseau lui-même mais les conséquences qu'on peut en tirer du point de vue mécanique (dimensionnement de galeries minières, exploitation de carrières de pierres ornementales), pour l'étude de l'écoulement et du transport (stockage de déchets, exploitation pétrolière), ou pour une modélisation du comportement thermo-hydro-mécanique (exploitation géothermique). Ce travail est réalisé par les spécialistes de ces disciplines, mais il exige au préalable une caractérisation de la morphologie des fractures individuelles.

En effet la morphologie des fractures subordonne leur aptitude à résister à un cisaillement et à modifier l'écoulement des fluides en fonction du régime des contraintes. Or si l'image d'une fracture aux épontes parfaitement planes et parallèles est très commode pour les calculs (par exemple la perméabilité est proportionnelle au cube de l'ouverture), c'est une idéalisation très éloignée de ce qu'on rencontre dans la nature, surtout en profondeur. En fait, les deux épontes d'une fracture sont souvent partiellement en contact, le vide interstitiel initial est totalement ou partiellement colmaté par un remplissage dû aux paléocirculations de fluide, les surfaces sont plus ou moins rugueuses, plus ou moins altérées, etc.

L'étude de l'écoulement au sein d'une fracture demande donc une représentation fine de la rugosité des épontes, des zones de contact et de la hauteur des vides. La modélisation de la topographie des épontes d'une fracture ainsi que de la hauteur du vide fissural relève des méthodes géostatistiques habituelles mais exige toutefois un soin particulier. En effet, comme les deux épontes sont généralement très semblables, la hauteur du vide dépend de petites différences entre ces deux surfaces. On peut bien sûr chercher à modéliser directement la hauteur du vide ; mais outre que les données doivent s'y prêter (mesure de la hauteur sur une empreinte du vide, ou mesure de la topographie des épontes en des points identiques), la hauteur du vide ne peut souvent être comprise qu'à partir des topographies des épontes.

Topographie d'une éponte

La variographie d'une éponte relève des méthodes monovariabiles stationnaires ou non stationnaires classiques (variogramme empirique, variogramme des résidus, variogramme généralisé). Les premiers travaux remontent à la thèse de Sylvie Gentier (1986). Un exemple en est donné dans Chilès & Delfiner (pp. 279-280). Lorsque cette topographie est très régulière aux petites distances (facettes de grains par exemple), le variogramme est parabolique à l'origine et peut se trouver mal modélisé sans qu'on s'en rende compte ; en effet le terme important est dans ce cas le terme cubique, qui se trouve dominé par le terme parabolique. Il est alors utile de calculer également le variogramme de dérivées partielles, ou plus exactement des différences finies qu'on peut calculer lorsque les mesures sont effectuées à pas régulier le long de profils.

Bien que ces gradients ne contiennent pas plus d'information que les données de topographie dont ils sont issus, leur variogramme, très sensible à la variabilité de la topographie à petite distance, facilite un ajustement cohérent du variogramme de la topographie. J'ai introduit cette démarche lors de l'étude d'une fracture du granite de Guéret (Gentier et al., 1991 ; Chilès & Gentier, 1993), comme l'illustre la figure 1. Cette approche a été reprise plus récemment par Antoine Marache (Marache et al., 2002) pour l'étude du comportement mécanique d'une fracture naturelle. On notera que la démarche est similaire à la modélisation conjointe du géopotential et du vent en météorologie.

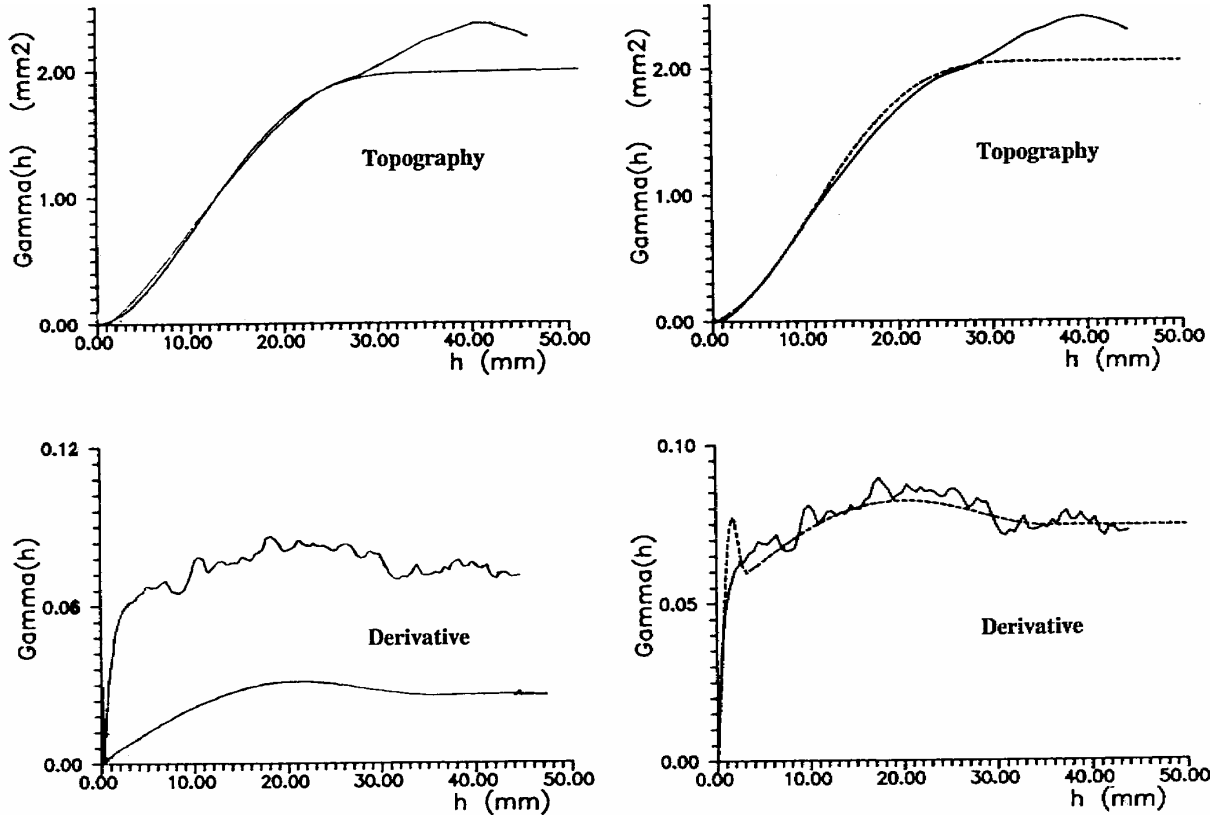


Figure 1. Variogrammes de la topographie d'une éponte et de ses dérivées partielles : à gauche : ajustement du variogramme de la topographie (apparemment très satisfaisant) et modèle induit pour le variogramme des dérivées (absolument pas satisfaisant) ; à droite : ajustement conjoint des deux variogrammes.

Hauteur du vide fissural

Un modèle particulièrement simple est celui d'une fracture dont les deux épontes sont identiques mais ont subi une translation latérale l'une par rapport à l'autre. Cette translation peut provenir d'un cisaillement (cas d'une faille) ou plus simplement de la relaxation des contraintes lors de la création d'un joint (le déplacement est alors faible, par exemple de quelques millimètres). Le variogramme de la hauteur du vide est alors fonction du variogramme $\gamma(h)$ de la topographie des épontes et du déplacement latéral relatif a des épontes. Par exemple, dans le cas où le déplacement est uniforme à l'échelle de la portion de fracture considérée et où le variogramme des épontes est linéaire, soit $\gamma(h) = c|h|$, $c > 0$, le variogramme de la hauteur du vide fissural dans la direction du déplacement a est

$$\gamma_{\text{vide}}(h) = \begin{cases} 2c|h| & \text{si } |h| \leq |a| \\ 2c|a| & \text{si } |h| \geq |a| \end{cases} \quad (h // a)$$

Il comporte une partie linéaire, de pente double de celle du variogramme des épontes, puis atteint un palier. La portée est a . Dans les autres directions la pente à l'origine et le palier restent les mêmes, mais la transition est plus progressive (la portée est plus grande). Autrement dit les paramètres (pente à l'origine, portée, palier, anisotropie) découlent directement du variogramme des épontes et du déplacement relatif des épontes. En particulier la portée du variogramme de l'ouverture n'est en rien une caractéristique des épontes mais mesure leur déplacement relatif. Un modèle en apparence aussi fruste a permis

de modéliser les variogrammes de joints stylolithiques (Chilès et Gentier, 1993). Bien sûr pour d'autres fractures, l'endommagement consécutif à un cisaillement, l'altération chimique ou les dépôts hydrothermaux rendent l'analyse plus complexe, mais il reste nécessaire de modéliser conjointement les variogrammes des épontes et du vide si on veut obtenir un résultat cohérent.

Cette caractérisation permet de construire des modèles numériques des épontes et du vide fissural par cokrigage, ou mieux par simulation conditionnelle. De tels modèles permettent une modélisation fine de l'écoulement et du transport au sein de la fracture (Tsang et Tsang, 1989, 1990) ou du comportement mécanique de la fracture sous l'effet d'une contrainte normale ou tangentielle (Marache et al. 2002 ; Marache, 2002). Reste à passer à l'échelle du réseau de fractures.

2.6. APPROCHES DE L'ÉCOULEMENT

L'observation des fractures en forage ou en affleurement et la modélisation géométrique du réseau de fractures sont importantes. Les essais hydrauliques et leur modélisation ne le sont pas moins, car ils permettent de hiérarchiser l'importance des diverses fractures et de déterminer comment se fait l'écoulement. Cette phase met en œuvre les résultats de la modélisation géométrique ainsi que les correspondances entre le modèle structural et l'aptitude des fractures à être hydrauliquement conductrices selon leurs relations avec les grandes failles ou les anticlinaux, leur orientation par rapport à celles du tenseur de contrainte, etc. Je n'ai pas contribué directement au développement de la méthodologie des calculs d'écoulement dans des milieux fracturés, qui est plutôt du ressort de l'hydromécanicien que du géostatisticien. Il n'est néanmoins pas inutile d'en dire quelques mots, dans la perspective d'une démarche plus intégrée, que nous évoquerons au chapitre suivant. On en trouvera un exposé plus complet dans les sections 4.13 à 4.16 de Chilès et de Marsily (1993), dues à Ghislain de Marsily, ainsi que dans Chilès (1999).

Percolation et connectivité du réseau de fractures

Dans une roche imperméable les écoulements ne peuvent se faire que si les fractures perméables sont suffisamment connectées. Avant de se lancer dans les calculs d'écoulement proprement dit, il est utile d'examiner le problème de la connectivité, qui est plus simple. Il ne faut bien sûr considérer dans cette analyse que les fractures susceptibles de participer à l'écoulement et non celles qui sont scellées ou imperméables.

Une première approche est fournie par la théorie de la percolation. Celle-ci vise à établir si l'on se trouve au-dessous du seuil de percolation (aucun écoulement), à son voisinage (auquel cas l'écoulement est caractérisé par des propriétés générales de connectivité) ou largement au-dessus du seuil (écoulement généralisé). La caractérisation du régime se fait sur la base de la comparaison d'une propriété moyenne du milieu à une valeur seuil ; cette propriété est par exemple le produit de trois termes : nombre moyen de centres de fractures par unité de volume, surface moyenne des fractures, demi-périmètre moyen des fractures. Dans des milieux où l'intensité de fracturation est régionalisée, ce qui est fréquent en pratique, ceci permet de déterminer l'intensité de fracturation pour laquelle le seuil de percolation est atteint localement, les autres caractéristiques restant inchangées. Ces résultats reposent toutefois sur un certain nombre d'hypothèses qui ne sont pas toujours réalisées, et la valeur seuil reste entourée d'un certain flou.

Une autre approche consiste à engendrer une ou plusieurs simulations du réseau de fractures et à étudier empiriquement la connectivité de ces réseaux. Billaux (1989) compte ainsi le nombre de fractures qui peuvent être atteintes depuis un forage d'injection en fonction de la distance au forage. Le graphe de cette fonction s'interprète aisément en termes de connectivité du champ proche et du champ plus lointain.

Chenalisation de l'écoulement

Si le calcul de l'écoulement au sein de quelques fractures représentées chacune par un modèle numérique détaillé est encore possible moyennant quelques approximations (Andersson et Dverstorp, 1987), sa généralisation à un réseau constitué de milliers ou de millions de telles fractures reste actuellement hors de portée. A cette échelle on est conduit à simplifier la géométrie des vides. Lorsqu'une fracture est soumise à une contrainte normale importante, comme c'est le cas en profondeur pour les fractures subhorizontales, elle se referme, les zones de contact entre les deux épontes se développent, l'écoulement n'est plus généralisé dans le plan de la fracture mais tend à se chenaliser. Si la matrice est suffisamment imperméable, comme c'est le cas pour les granites, l'écoulement se concentre dans ces chenaux. Ceci a conduit Marie-Christine Cacas et Daniel Billaux à concevoir l'une et l'autre des modèles où les écoulements se font dans des chenaux linéaires. Ceux-ci comprennent les intersections entre fractures ainsi que des conduits internes à chaque fracture.

L'idéal serait de déterminer les chenaux à partir d'une représentation des vides. C'est ce qu'a tenté Billaux (1990), en recourant à des techniques d'analyse d'image (essentiellement une squelettisation). Il a néanmoins obtenu un réseau qui reste trop complexe. Aussi en pratique la génération des chenaux représentant une fracture est-elle faite a priori. Deux voies ont été suivies :

- Cacas (1989) considère les intersections entre fractures comme des chenaux et y ajoute un minimum de chenaux placés de façon à ce que la connectivité du réseau de chenaux reproduise la connectivité du réseau de fractures ;
- Billaux (1990) place dans chaque fracture un réseau booléen de conduits représentant les chenaux ; l'intersection de deux fractures, comme précédemment, constitue également un chenal ; deux fractures qui s'intersectent peuvent par conséquent être connectées par des chenaux, mais ce n'est pas systématique.

Dans le cas d'une matrice imperméable, une fois chaque fracture représentée par des chenaux, le problème de l'écoulement au sein du réseau de fractures est ramené à celui de l'écoulement au sein d'un réseau de chenaux monodimensionnels. Il peut être calculé une fois fixées les conductivités hydrauliques intégrées des chenaux, qui lient débit dans le conduit et gradient de charge, et bien sûr les conditions aux limites. En pratique on se donne une loi statistique pour ces conductivités, et on cale ses paramètres par calibration sur des tests hydrodynamiques. Les résultats font l'objet d'une validation par l'interprétation de tests de transport (traçages). Du point de vue pratique, les modèles de Cacas et de Billaux ont fait l'objet d'une comparaison sur des données du site de Stripa (Chilès et al., 1992).

Matrice poreuse ou perméable

Les modèles à base de chenaux sont utilisés dans les milieux comme les granites où la matrice est imperméable et où les fractures fournissent à la fois la capacité d'emménagement de fluide et la perméabilité. Lorsqu'au contraire la matrice est poreuse, elle constitue l'essentiel de la capacité de stockage alors que les fractures continuent à assurer l'essentiel de l'écoulement. Divers modèles ont été développés pour de tels milieux : modèle mixte continu / discret de Carrera et Martinez (1999) où les fractures principales sont représentées comme des objets 2D dans une matrice poreuse 3D ; modèle à double porosité et à double perméabilité (Warren et Root, 1963 ; Douglas et Arbogast, 1990), où le réservoir est décrit par deux milieux poreux, représentant respectivement la matrice (et les fractures non connectées) et le réseau des fractures connectées, et par des échanges de fluide entre les deux milieux poreux. Signalons à titre d'exemple, à l'échelle d'un réservoir, la méthode simplifiée proposée par Bourbiaux et al. (1998) pour transformer un modèle de fractures discrètes en un modèle équivalent à double porosité.

Comme la modélisation géométrique, la modélisation des écoulements et du transport doit intégrer les informations apportées par le contexte géologique et géomécanique (voir par exemple Odling, 1997b).

Milieu continu équivalent

Les calculs d'écoulement chenalisé peuvent être réalisés pour des réseaux assez importants (de l'ordre du million de conduits actuellement). Si cette limite paraît importante, elle peut néanmoins être atteinte avec un bloc de 100 m de côté. Aussi est-il appréciable de pouvoir remplacer le modèle discret, au-delà d'une certaine échelle, par un milieu continu présentant les mêmes caractéristiques hydrodynamiques. Cette échelle correspond à ce qu'on appelle le "volume élémentaire représentatif". Dans un milieu fracturé, et notamment si la loi des longueurs des fractures est très étalée, le volume élémentaire représentatif peut être très grand, voire ne pas exister si on n'atteint pas le seuil de percolation.

Pour déterminer si à une échelle donnée le modèle discret se comporte comme un milieu continu, on engendre une simulation du réseau à cette échelle. On considère alors plusieurs directions de calcul de l'écoulement (à 3D, une centaine). Pour chacune d'elles, on impose des conditions aux limites correspondant à un gradient de charge constant, et on calcule le débit en régime hydraulique permanent aux exutoires du modèle. La perméabilité directionnelle est déduite de la loi de Darcy. Si les perméabilités directionnelles obtenues peuvent être représentées par un tenseur, le milieu fracturé se comporte à cette échelle comme un milieu continu.

Cette méthode, développée par Jane Long et Daniel Billaux, a été appliquée à des simulations de réseaux de fractures dans des granites aussi bien que dans des grès. Dans le cas d'un milieu stratifié à matrice imperméable, on a par exemple montré qu'on observait un comportement de milieu continu seulement si la perméabilité des joints verticaux était du même ordre de grandeur que celle des interbancs (Castaing et al., 2002). En effet si les joints de stratification sont imperméables, l'écoulement reste confiné à l'intérieur de chaque banc ; si au contraire ils sont très perméables, l'écoulement passe seulement par ces joints ; dans les deux cas l'écoulement est horizontal. Les conditions sont bien sûr moins sévères si la matrice est perméable.

Les travaux réalisés permettent donc de construire des modèles numériques de réseaux de fractures similaires à des réseaux observés (objets de l'étude ou analogues) et de calculer l'écoulement et le transport dans ces réseaux, à condition bien sûr de disposer de suffisamment d'informations pour caler la distribution des conductivités hydrauliques.

CHAPITRE 3

Perspectives

Si la géostatistique classique repose sur des bases solides depuis trois décennies et si de grands progrès ont été accomplis depuis, la diversité des domaines d'application, la meilleure connaissance des lois et processus physiques, le nombre sans cesse croissant des données directes et surtout indirectes, notamment en matière d'imagerie, laissent la place à de nombreuses voies de recherche. Il n'est évidemment pas possible d'être exhaustif et je me limiterai à quelques sujets qui me tiennent à cœur. Je commencerai par un problème auquel tout praticien a peu ou prou été confronté, la détermination de l'histogramme.

3.1. MODELISATION DE LA LOI MARGINALE

La mise en œuvre de la géostatistique même la plus banale s'accompagne souvent d'approximations qu'une longue pratique ne suffit pas à justifier. C'est le cas en particulier des traitements qui exigent la connaissance de la moyenne ou de la loi marginale. En effet, d'une part la géostatistique linéaire travaille à l'aide des moments d'ordre 2 en s'affranchissant du moment d'ordre 1, suspecté de ne pas exister ou de ne pouvoir être évalué de façon satisfaisante, ce qui a conduit aux fonctions aléatoires intrinsèques puis aux FAI- k . D'autre part les méthodes non linéaires et les simulations conditionnelles exigent non seulement le moment d'ordre 1 mais encore la loi marginale, et curieusement celle-ci est évaluée sans y porter l'attention qu'elle mérite. Ceci touche aussi bien les variables à loi marginale continue que les variables catégorielles.

Anamorphose

Pour la mise en œuvre du krigeage disjonctif ou des simulations conditionnelles dans un cadre stationnaire, on considère la variable étudiée comme l'anamorphosée d'une fonction aléatoire dont la loi spatiale ou au moins les lois bivariées ont de "bonnes" propriétés. Sans discuter ici du bien fondé de cette hypothèse, la fonction d'anamorphose est habituellement déduite de l'histogramme expérimental des données, celui-ci étant considéré comme représentatif de la loi marginale. Si cette dernière hypothèse paraît raisonnable lorsque les données sont implantées de façon assez régulière et que le domaine d'étude est grand par rapport à la portée, il n'en est rien dans les cas contraires. Ceci peut avoir des conséquences très dommageables.

En effet la pratique courante consiste à transformer les données par une anamorphose inverse qui leur donne une loi marginale normale réduite. L'anamorphose est le plus souvent

définie par classement des données puis par un développement en polynômes d'Hermite. Le variogramme expérimental des données transformées a alors par construction une moyenne égale à l'unité, et donc un palier qui peut être largement supérieur à 1 si la portée est plus grande que le domaine couvert par les données. Autrement dit, la variance de la fonction aléatoire de la gaussienne est supérieure à 1. Il y a alors contradiction entre sa loi marginale, modélisée avec une variance égale à 1, et sa variance, modélisée comme supérieure à 1 dans le variogramme. On peut bien sûr considérer que l'histogramme expérimental ne représente pas la loi marginale a priori mais seulement une loi régionale. Il n'empêche que dès qu'on simulera en extrapolation, on s'exposera à obtenir des valeurs simulées bien supérieures à celles d'une loi normale réduite et à ce que leur anamorphose donne des valeurs fantaisistes, surtout si cette anamorphose est obtenue par un développement en polynômes d'Hermite.

Comme pour l'étude du variogramme, il conviendrait de distinguer la loi marginale empirique (l'histogramme expérimental), la loi marginale régionale (à l'échelle du domaine étudié) et la loi marginale a priori (celle du modèle). Il faudrait alors rechercher quelle loi marginale et quel variogramme sont compatibles avec l'histogramme et le variogramme empiriques.

Courbes de proportion

La modélisation de faciès lithologiques s'effectue principalement par les gaussiennes ou plurigaussiennes seuillées, par des modèles booléens ou par des méthodes d'indicatrices (Lantuéjoul, 2002 ; Armstrong et al., 2003). Quel que soit le modèle employé, ses caractéristiques sont liées à celles de la fonction catégorielle des faciès (numéro de faciès), ou ce qui revient au même, aux caractéristiques des indicatrices des faciès. La ou les lois marginales sont simplement les proportions des différents faciès. Leur détermination peut être vue comme relevant du problème ci-dessus, souvent amplifié par une hypothèse de non stationnarité.

Un faciès donné est représenté par une fonction indicatrice $i(x, y, z)$, qui est interprétée comme une réalisation d'une indicatrice aléatoire $I(x, y, z)$. Dans les applications réelles, la répartition des faciès n'est pas homogène dans l'espace. Ceci a tout d'abord conduit à définir une courbe verticale de proportion $p(z)$, obtenue comme la moyenne des $i(x, y, z)$ disponibles pour chaque valeur de z (moyenne dans plusieurs forages, ou moyenne sur une falaise verticale). Pour tenir compte de variations latérales de faciès, on est passé ensuite à un découpage en blocs verticaux avec une courbe de proportion par bloc. Cette courbe de proportion n'est pas disponible partout. En pratique on la calcule le long de forages, puis on l'interpole, et le résultat est pris comme "la" moyenne (au sens espérance mathématique) de $I(x, y, z)$. Le modèle numérique de proportions ainsi obtenu est alors utilisé pour engendrer un grand nombre de simulations conditionnelles improprement dites "équiprobables" (en fait tirées indépendamment dans la loi conditionnelle).

La situation est encore plus périlleuse que pour une variable continue, puisqu'on se place dans un cadre non stationnaire, avec de surcroît un modèle non paramétrique de la moyenne. Haas et Formery (2002) proposent une solution dans un contexte bayésien, qui est mise en application par Biver et al. (2002). Dans le cas d'une proportion stationnaire, sa valeur a priori est supposée distribuée uniformément dans $[0, 1]$, ou suivre une loi a priori donnée, en pratique une loi bêta (dont la loi uniforme est un cas particulier). La loi a posteriori déduite des données est alors également une loi bêta.

Cette approche se généralise à plusieurs faciès, des lois de Dirichlet (vecteur des proportions) se substituant aux lois bêta (une seule proportion). Elle se généralise à des proportions qui varient spatialement – et qui définissent donc un champ vectoriel aléatoire – à condition de disposer d'un modèle a priori, et en pratique dans le cadre d'un modèle où les indicatrices sont en corrélation intrinsèque, ce qui est rarement le cas.

On sait que la connaissance des proportions et des covariances directes et croisées ne suffit pas à définir une fonction aléatoire catégorielle. Le problème de la détermination des proportions peut être examiné dans des cadres plus complètement spécifiés. Prenons par exemple une fonction aléatoire à trois faciès A, B et C, obtenue par seuillage de deux FAST gaussiennes Y_1 et Y_2 indépendantes selon le schéma de la figure 1 (les axes correspondant à y_1 et y_2 , qui varient entre $-\infty$ et $+\infty$, sont gradués selon $G(y_1)$ et $G(y_2)$, qui varient entre 0 et 1 ; les aires des faciès sont ainsi proportionnelles à leurs proportions). Les deux paramètres qui nous intéressent sont en fait les seuils s_1 et s_2 , qui contiennent la même information que les proportions p_A , p_B et p_C une fois fixée la forme du drapeau de la figure 2.

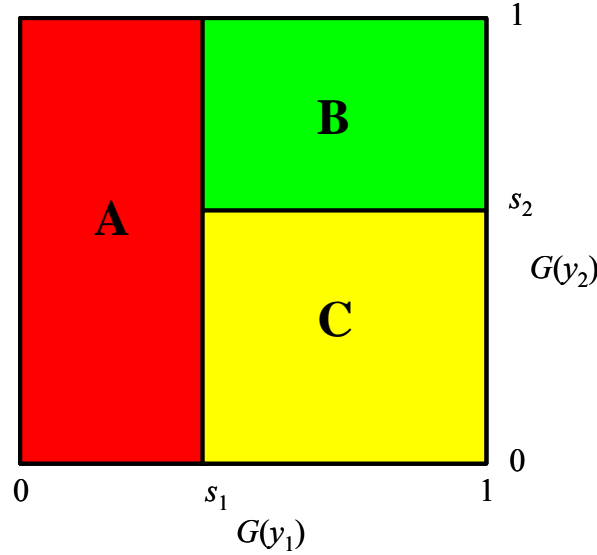


Figure 2. Drapeau de proportions à trois faciès.

Si ces seuils varient d'une façon trop complexe pour être représentés par des fonctions déterministes, on peut les considérer comme des fonctions aléatoires qu'on supposera stationnaires. Les données apportent toutes une information sur la valeur de Y_1 par rapport à celle de S_1 , et les données situées dans B ou C apportent une information sur la valeur de Y_2 par rapport à celle de S_2 . Pour pouvoir mettre en œuvre un tel modèle, il reste à développer une méthode de détermination des diverses covariances, puis de simulation de S_1 et S_2 puis de Y_1 et Y_2 conditionnellement aux données d'indicatrice. Le problème est sans doute ardu mais peut être développé dans un cadre gaussien (c'est-à-dire en supposant que les fonctions aléatoires S_1 et S_2 sont gaussiennes, puisque Y_1 et Y_2 le sont déjà) et en supposant que S_1 et S_2 sont plus régulières que Y_1 et Y_2 .

3.2. MODELISATION GEOLOGIQUE 3D

La modélisation d'objets géologiques relève de deux classes de techniques :

- *la modélisation surfacique* : Elle consiste à modéliser les interfaces. Cette approche est bien adaptée à des couches sédimentaires subhorizontales : notant $Z_i(x)$, $x \in \mathbb{R}^2$, la cote de l'interface i , on est ramené à la modélisation de n fonctions de \mathbb{R}^2 . L'approche géostatistique classique est alors tout à fait adaptée : elle fournit une estimation et un écart-type (cokrigage), ou des simulations conditionnelles. C'est celle qui est utilisée dans nombre de projets de modélisation de réservoirs.
- *la modélisation volumique* : On modélise les fonctions indicatrices des différents objets, ou ce qui revient au même une fonction catégorielle qui donne en tout point x de \mathbb{R}^3 le numéro ou le code de l'objet géologique auquel appartient le point x . Une variante est une méthode qui repose sur la modélisation de p fonctions continues, à valeurs dans \mathbb{R} , une partition adéquate de l'espace \mathbb{R}^3 du vecteur des valeurs prises par ces p fonctions donnant alors les différentes unités (plurigaussiennes seuillées, champs de potentiel). Cette approche est utilisée pour des objets complexes (plis couchés, inclusions granitiques, etc.).

L'emploi de ces méthodes en modélisation géologique demande de résoudre deux types de problèmes, qui font actuellement l'objet de la thèse de Christophe Aug : la caractérisation de l'incertitude sur le modèle et la prise en compte d'informations complémentaires.

Incertainitude sur les modèles construits par la méthode des champs de potentiel

Lorsqu'on peut recourir à des interpolations 2D des cotes des interfaces géologiques, on sait depuis longtemps assortir l'estimation d'une variance d'estimation qu'on peut traduire en intervalle de confiance sous l'hypothèse que l'erreur d'estimation est gaussienne. Par contre lorsqu'on doit recourir à des méthodes volumiques, il s'agit habituellement de méthodes déterministes ou de méthodes d'inspiration géostatistique mais qui restent conventionnelles en ce sens que les paramètres structuraux utilisés sont fixés a priori, sans aucune analyse structurale préalable, et ne permettent donc pas d'assortir le modèle d'une fourchette d'incertitude.

Il en est ainsi de la méthode des champs de potentiel telle qu'elle a été développée par Christian Lajaunie pour l'éditeur géologique 3D du BRGM dans le cadre du programme GéoFrance 3D (Lajaunie et al., 1997). Chaque interface géologique est une isopotentielle d'un champ de potentiel défini à 3D. Les données sont de deux types : lorsqu'on dispose de n points appartenant à une même interface, on leur associe $n - 1$ accroissements de potentiel de valeur nulle ; d'autre part, les données concernant la direction et la polarité des structures sont considérées comme des données de gradient du potentiel. Les données d'accroissement de potentiel étant de valeur nulle, elles n'apportent pas d'information exploitable sur la covariance du potentiel. Aussi la méthode développée initialement était-elle utilisée de façon heuristique, avec pour covariance du potentiel un modèle choisi par le géologue, sans aucune assistance. Des contraintes ont été ultérieurement apportées pour assurer une cohérence entre la variabilité du potentiel, la variabilité du gradient et les variances des diverses erreurs de mesure, mais sans apporter d'aide au choix de la portée – ou des portées – de la covariance.

Or si les données de gradient sont suffisamment nombreuses et fiables, elles apportent une information importante, qui peut être exploitée, notamment pour caractériser l'anisotropie éventuelle du champ de potentiel et ses portées. Il est alors possible d'associer au krigeage du potentiel un écart-type d'estimation qui peut ensuite être utilisé pour évaluer l'incertitude sur la position des interfaces géologiques (cf. fig. 3). Il est également envisageable de construire des simulations conditionnelles.

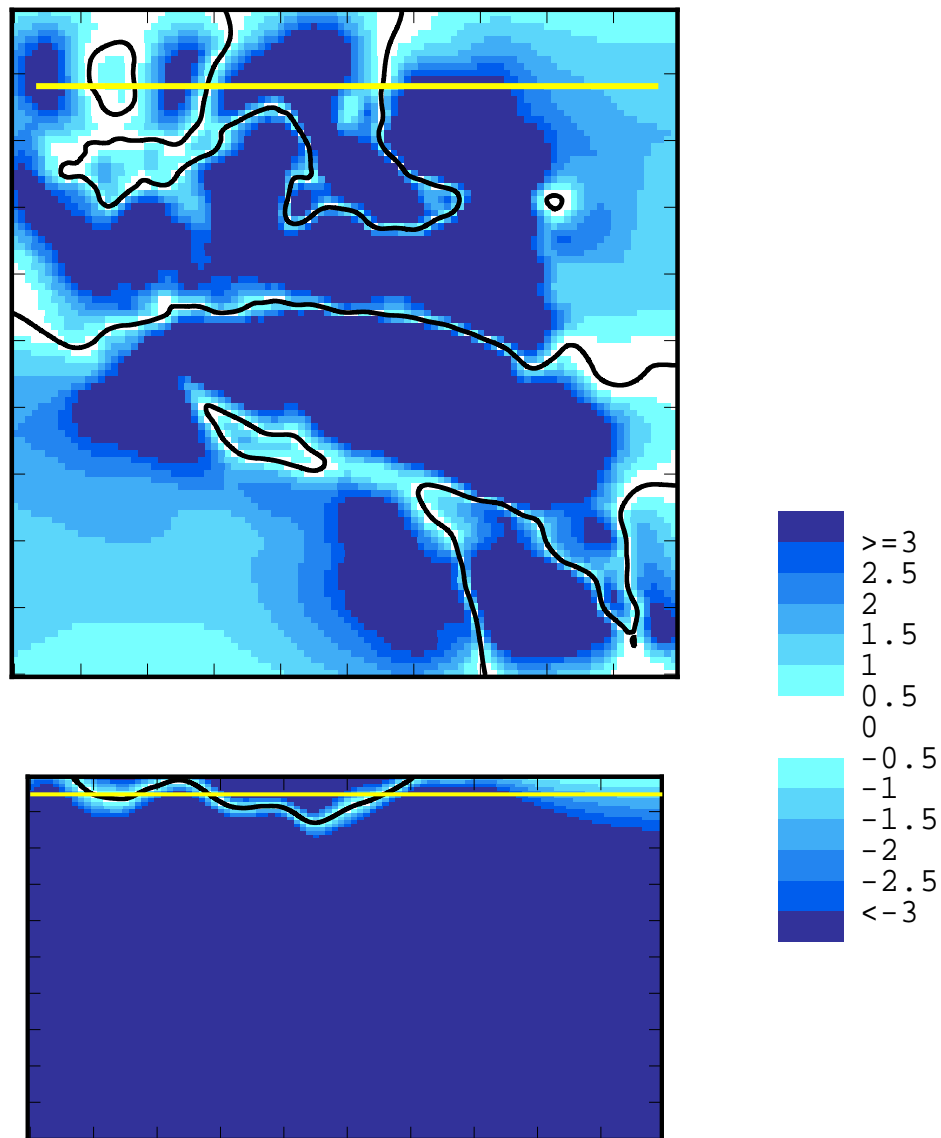


Figure 3. Représentation de l'incertitude sur la position d'une interface géologique (toit des gneiss, Limousin) : représentation de la variable réduite $(Z^* - Z_0) / \sigma_K$, où Z^* et σ_K sont le krigeage et l'écart-type de krigeage et Z_0 le potentiel de l'interface. Les données sont toutes localisées en surface (carte géologique et données d'orientation). En haut : cartographie d'une zone de 65 km x 65 km dans le plan horizontal d'altitude 500 m ; en bas : cartographie d'une section verticale E-W de 62 km d'extension et 34 km de profondeur. La courbe en noir représente l'interface krigée. L'interface réelle peut en fait se trouver dans les zones colorées, mais avec d'autant moins de probabilité que la zone est sombre. Les zones les plus sombres peuvent être considérées comme des zones d'exclusion. D'après Aug (2003).

Prise en compte d'informations auxiliaires

Dans tous les cas, l'automatisation de la construction du modèle 3D exige des solutions à une série de problèmes pratiques :

- *prise en compte des fins de forage* : Le plus souvent, on ne prend en compte que les données correspondant aux interfaces ; on perd donc l'information apportée par la fin du forage, à savoir que le mur de la couche où s'arrête le forage se trouve à une altitude inférieure à celle de la fin du forage. La prise en compte d'inégalités de ce type est résolue pour des variables gaussiennes stationnaires grâce à l'échantillonneur de Gibbs. Elle doit être généralisée à d'autres cas, notamment non stationnaires. Le problème symétrique se pose d'ailleurs pour les têtes de sondage (le toit de la formation où débute le forage se trouve au-dessus de la topographie).
- *prise en compte de la carte géologique* : Le problème est de même nature que le précédent, mais pour une information bidimensionnelle et non pas linéaire : en considérant pour simplifier que les couleurs de la carte géologique donnent la lithologie en surface, si en un point de la carte géologique est rouge cela signifie que le mur de la couche rouge est en dessous de la topographie et son toit avant érosion au-dessus (sauf inversion des couches). Habituellement on ne prend en compte que les points situés sur les interfaces (les limites des polygones colorés), mais cela ne suffit pas à ce que la carte géologique soit partout respectée, surtout si les structures sont peu pentées.
- *modélisation et prise en compte des failles* : Les failles peuvent être considérées comme des fonctions de dérive des champs de potentiel associés aux formations. Le plan de faille peut être défini de diverses manières (notamment comme une isopotentielle d'un champ de potentiel propre à la faille). Reste à définir la fonction de faille en 3D compte tenu du plan de faille et d'hypothèses sur le type de la faille (normale, inverse, etc.).
- *détection des données suspectes* : En pratique, on peut avoir à construire un modèle à partir de plusieurs milliers de forages. Parmi ceux-ci, un nombre non négligeable sont erronés (mauvaises coordonnées de la tête de forage, mauvais codage de la géologie, profondeur incorrecte). Il faut donc se garder d'appliquer un algorithme cherchant à tout prix à respecter toutes les données, mais au contraire attirer l'attention du modélisateur sur les données suspectes. Ceci exige de développer des techniques de validation croisée appropriées.

Cette méthode a déjà reçu des applications en domaine métamorphique ou alluvial. Il reste bien d'autres situations à envisager, par exemple le cas de kimberlites, avec à chaque fois des covariances adaptées.

3.3. QUELQUES NOUVEAUX MODELES PROBABILISTES

Quelques sujets sur lesquels des recherches n'ont pas encore été entreprises au Centre de géostatistique méritent d'être examinés.

Statistiques multipoints

La géostatistique a été développée au départ dans des situations où les données étaient éparées. On dispose néanmoins de plus en plus d'analogues ou de variables auxiliaires connues de façon exhaustive sur un bloc 3D ou une section 2D. Il est alors aisé de construire des statistiques portant sur plusieurs points, voire de considérer des éléments structurants comme en morphologie mathématique, et il est clair que se limiter à des statistiques bivariées est très réducteur. Construire des modèles généraux de lois multipoints – non liés à une loi spatiale donnée – n'est pas chose aisée.

Pour contourner le problème, et dans le cadre de la construction d'une simulation selon une méthode séquentielle, Guardiano et Srivastava (1993) prennent sur une image d'entraînement les lois multivariées dont ils ont besoin. La méthode a été améliorée par Strebelle et Journel (2001) et Strebelle (2002). Elle ne s'applique qu'à des indicatrices ou à des variables catégorielles ne prenant que quelques valeurs distinctes. Malgré tout le soin qu'on peut apporter à sa mise en œuvre, on retrouve le problème de la distinction entre un histogramme expérimental et une loi statistique, aggravé par le fait que la cohérence interne des diverses lois multivariées obtenues n'est pas assurée. On ne peut donc faire l'économie d'une étude des familles de lois multivariées possibles jusqu'à un nombre donné de points d'appui, à commencer par trois points d'appui. La théorie des copules (voir par exemple Joe, 1997) fournit des modèles de lois multivariées, utilisés notamment en statistiques financières pour des variables aléatoires vectorielles. La loi multivariée est exprimée comme le produit des lois marginales et d'une fonction qui représente les relations de dépendance entre les diverses variables. Cette fonction permet par exemple de représenter une meilleure corrélation des hautes valeurs que des valeurs moyennes, contrairement à un modèle multigaussien. Les copules semblent donc constituer une voie prometteuse même si leur application en statistiques spatiales ne va pas de soi, car certaines ne peuvent pas représenter une corrélation variant avec la distance, d'autres ne peuvent rendre compte de corrélations fortes si le nombre de variables est élevé, etc. (Armstrong et Galli, 2003). Il est clair qu'il s'agit là d'un sujet de longue haleine.

Modèles spatio-temporels

Avec le développement des applications environnementales, il est de plus en plus fréquent qu'on ait besoin de modéliser des covariances spatio-temporelles. Dans une application récente (Bourgine et al., 2001), nous avons montré que l'évolution de la topographie d'une plage de sable de Hollande pouvait être représentée par une covariance de la forme

$$C(h_{//}, h_{\perp}, u) = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|h_{//}|}{a_{//}}\right) \frac{a_{\perp}}{|h_{\perp}|} \sin\left(\frac{|h_{\perp}|}{a_{\perp}}\right) \exp\left(-\frac{|u|}{a_T}\right)$$

où $h_{//}$, h_{\perp} et u représentent les composantes de la distance parallèlement à la côte, perpendiculairement à la côte, et dans le temps, avec $\sigma^2 = 0.7 \text{ m}^2$, $a_{//} = 400 \text{ m}$, $a_{\perp} = 33 \text{ m}$, $a_T = 1 \text{ année}$. Il s'agit d'un modèle factorisé : la covariance dans l'espace à trois dimensions

(deux d'espace et une de temps) est le produit de trois covariances dans des espaces monodimensionnels. C'est un modèle classique de modèle anisotrope, à côté des anisotropies géométriques et zonales couramment utilisées dans \mathbb{R}^2 ou \mathbb{R}^3 .

De tels modèles ont toutefois des limites. Le modèle ci-dessus par exemple rend compte de mesures annuelles et ne doit donc pas être utilisé pour des intervalles de temps inférieurs à l'année. Ce modèle présente des effets de trou dans la direction perpendiculaire à la côte, ce qui correspond bien aux pseudo-périodicités observées classiquement (barres et baïnes). Mais on sait que les barres et baïnes se déplacent latéralement, ce qui doit conduire à un modèle plus complexe que le modèle ci-dessus si l'on veut représenter le temps en continu.

Un modèle original a été proposé par Gneiting (2002), qui contient des modèles factorisés comme cas particuliers. Dans ce modèle les covariances sont des fonctions complètement symétriques au sens qu'elles satisfont

$$C(h, u) = C(-h, u) = C(h, -u) = C(-h, -u),$$

D'autres modèles ont proposés, notamment par Cressie et Huang (1999) et par De Iaco et al. (2002). Ces modèles ne sont sans doute pas appropriés dans le cas présent, car ils ne permettent pas de représenter un lent mais régulier déplacement des objets parallèlement à la côte. Il reste donc à développer d'autres modèles. Dans le cas présent, il s'agit peut-être

simplement d'introduire un terme fonction de $\left| \frac{h_{//}}{b_{//}} - \frac{u}{b_T} \right|$.

Ceci ne constitue bien sûr qu'un problème parmi tous ceux que posent les phénomènes spatio-temporels, comme la prise en compte de périodicités ou du moins de variations saisonnières, ou la représentation de covariances non stationnaires (cf. Høst et al., 1995; Sampson et al., 2001).

Données territoriales

Les données territoriales comme celles que traitent les organismes statistiques nationaux (l'INSEE en France) présentent des caractéristiques particulières : ce sont des données agrégées sur des entités administratives (commune, département, région, pays), donc concernant des superficies et des populations très variables. Lorsque ces données présentent une variabilité spatiale, chaque mesure est relative à un support différent. Si on s'intéresse au rendement moyen à l'hectare dans un secteur où la surface est très majoritairement consacrée aux cultures céréalières, la prise en compte de l'effet de support relève des méthodes classiques. Si par contre on s'intéresse au taux moyen de fécondité ou au revenu moyen par foyer, l'effet de support n'est pas tant fonction de la superficie de l'entité administrative que de sa population : à superficie égale, une commune rurale présente moins de variabilité interne qu'une ville ; et par contre la variabilité d'une commune à l'autre est plus forte entre de petites communes qu'entre de grandes villes. Ceci n'empêche pas qu'à population comparable, la corrélation entre les caractéristiques de deux entités puisse être une fonction de la distance géographique ou de la distance sur le graphe défini par les relations de voisinage entre communes. D'où l'intérêt d'explorer les modèles de covariance définis sur des graphes (cf. Kondor et Lafferty, 2002 ; Smola et Kondor, 2003) et de développer des modèles spécifiques pour la prise en compte de l'effet de support.

Il faut de plus distinguer selon que chaque donnée provient d'un comptage exhaustif (comptage sur une image satellite, recensement) ou non (sondage). S'ajoutent à cela les aspects de variabilité temporelle, y compris dans le cas, de plus en plus fréquent, où l'acquisition est asynchrone (renouvellement d'une fraction des mesures chaque année par exemple).

Approche probabiliste et floue

Nombre de problèmes de risque sont liés au dépassement d'un seuil. Prenons par exemple le risque lié à la consommation de produits maraîchers cultivés sur des surfaces contaminées par les retombées de fumées d'usine. Le problème fait intervenir l'estimation de la contamination du sol, le transfert du produit contaminant du sol aux plantes, la quantité de produit finalement absorbée par un consommateur, enfin sa comparaison à un seuil présentant un danger pour la santé. Le premier point peut relever de l'approche géostatistique. Les deux points suivants sont généralement représentés par des relations simples, dont les paramètres sont mal connus parce qu'on dispose de peu de données pour les étalonner. Une approche bayésienne permet en théorie d'obtenir la loi a posteriori de ces paramètres, mais cette loi n'est pas représentative lorsqu'on dispose de peu de données. L'approche floue, de ce point de vue moins exigeante, paraît plus appropriée.

Le seuil quant à lui est une valeur déterministe s'il est fixé réglementairement. Dans une approche plus fine, ce seuil n'est en fait pas très bien connu. Il dépend des caractéristiques de la personne concernée (âge et poids), de sa consommation, de la durée d'exposition au risque, etc., et peut être représenté par un nombre flou.

Se pose alors le problème du dépassement d'un seuil fixe ou flou par une consommation évaluée au moyen de relations floues à partir d'une estimation de la concentration assortie d'une erreur aléatoire. Une première approche hybride combinant les aspects flous et probabilistes a été examinée dans un cas simple (Guyonnet et al., 2003). Elle demande à être élargie à des situations plus complexes. Dans mon esprit, il ne s'agit pas de conduire une recherche purement théorique sur ce vaste sujet, sur lequel travaillent d'ailleurs d'autres équipes comme celle de Didier Dubois et Henri Prade à l'IRIT à Toulouse, mais d'avancer à partir de sujets concrets.

3.4. PRISE EN COMPTE DE LOIS ET PROCESSUS PHYSIQUES ET GEOLOGIQUES

L'évolution de la technique apporte des données de plus en plus nombreuses et variées et les recherches aboutissent à une meilleure connaissance des lois et processus régissant les phénomènes physiques et géologiques. La géostatistique doit tirer parti de ces données et de ces connaissances. Trois sujets développés au Centre de géostatistique bien avant mon arrivée méritent d'être mentionnés.

Vitesse sismique

En sismique pétrolière, la connaissance du champ de vitesse est nécessaire à la transformation des temps de parcours de l'onde sismique en profondeur des horizons géologiques. Si le champ de vitesse instantanée n'est disponible que dans les forages, on dispose d'autres données qui lui sont liées comme des vitesses de tranche ou des vitesses de

stack. Les données en forage permettent de modéliser la variabilité verticale du champ de vitesse. Les autres données doivent être exploitées pour déterminer sa variabilité horizontale. Il s'agit d'un problème analogue à celui de la détermination du champ de perméabilité d'un milieu poreux hétérogène à partir de données de piézométrie, avec ici des lois physiques plus complexes. Trois thèses successives (Mustapha Touati, 1996 ; Bertrand Iooss, 1998 ; David Geraets, 2002) permettent d'obtenir la covariance du champ de vitesse instantanée à partir de l'analyse soit des données pré-stack, soit des données de stack. Des méthodes rigoureuses de simulation conditionnelle du champ de vitesse à partir de ces données ont également été développées.

Ces résultats ouvrent de nouvelles perspectives pour l'intégration des données sismiques en caractérisation de réservoir ou pour la simulation des erreurs de migration. Ils permettent d'envisager l'inversion bayésienne de données de vitesse à partir d'un modèle a priori déjà bien spécifié. Il reste à les généraliser à des hypothèses moins restrictives que celles envisagées jusqu'ici : couches pentées, vitesse anisotrope, etc.

Modèles génétiques stochastiques

Les phénomènes géologiques ne sont pas régis par des lois physiques aussi bien établies que les lois physiques. Néanmoins un nombre croissant de processus géologiques et géochimiques sont compris et font l'objet d'une modélisation. Ces modèles n'ont pas un caractère déterministe et peuvent être exprimés dans un cadre stochastique. Il en est ainsi de la genèse de chenaux méandriformes, qui a donné lieu à la thèse de Simon Lopez (2003). Le modèle construit simule le développement de chenaux dans le temps, avec l'évolution des méandres, les ruptures de berge, les chenaux abandonnés, les dépôts de sable ou d'argile, le tout en fonction de l'érodabilité des terrains et de l'évolution du niveau marin, etc. Si le travail a permis de spécifier un modèle suffisamment souple et réaliste reposant sur un nombre limité de paramètres, un important travail est encore en cours de réalisation pour l'identification des paramètres et le développement de méthodes de simulation conditionnelle.

D'autres contextes de réservoirs méritent le développement d'une approche comparable, à commencer par les réservoirs carbonatés, qui représentent 60% des réserves de pétrole. Ces réservoirs sont très hétérogènes et d'une grande complexité. Aux processus de mise en place des roches calcaires (croissance biologique et sédimentation), qui présentent déjà une grande variabilité, s'ajoutent des processus diagénétiques d'altération. Ces derniers sont souvent guidés par les conduits qui permettent une migration des fluides, lesquels sont eux-mêmes déterminés par l'architecture du dépôt. Ici aussi, une approche génétique stochastique, une fois un modèle suffisamment réaliste défini, doit permettre de construire des simulations respectant les observations en forage et les informations à basse résolution apportées par la géophysique 3D.

Assimilation séquentielle de données

La géostatistique spatio-temporelle traditionnelle (Kyriakidis et Journel, 1999) n'est pas en mesure de décrire adéquatement la dynamique, en général fortement non linéaire, de processus spatio-temporels impliquant un grand nombre de variables. Pour cela les modèles de transport physico-chimiques sont en général bien mieux adaptés. Cependant, étant donné que ces derniers ne maîtrisent pas totalement la complexité des processus qu'ils cherchent à

décrire, soit parce qu'ils sont fondés sur des hypothèses simplificatrices, soit parce que l'information servant à établir les conditions initiales et aux limites est imparfaite, il est opportun d'introduire des techniques statistiques servant à les guider pour assimiler un flot de mesures émanant de capteurs automatiques.

Des projets récents ont permis d'explorer ces techniques dans le domaine de l'océanographie et de la pollution de l'air. Il s'est très vite avéré que la géostatistique offrait des concepts et des approches qui pouvaient contribuer à enrichir les techniques d'assimilation séquentielle de données (Sénégal et al., 2001). La thèse de Laurent Bertino (2001) et des publications ultérieures (cf. Bertino et al., 2003) ont permis de développer cette thématique très porteuse.

Du point de vue du concepteur de modèles numériques déterministes, l'assimilation de données peut être vue comme un algorithme permettant de corriger l'état du modèle au fur et à mesure que des données nouvelles arrivent. Du point de vue du statisticien, qui nous concerne ici, le modèle numérique peut aider à améliorer la prédiction opérationnelle en profitant de la connaissance des relations non linéaires entre différentes sources de données. La géostatistique se situe au carrefour de tous les flux de données, qu'elles proviennent d'un réseau de capteurs, d'un modèle de transport couplé avec d'autres sources de données ou d'images de télédétection. Avec ses modèles multivariés, ses méthodes d'anamorphose, ses modèles de changement de support ainsi que ses méthodes de simulation conditionnelle, la géostatistique offre un cadre intégrateur pour relier ces différentes informations, comprendre et modéliser leur structure statistique, élaborer des outils de prévision.

3.5. MILIEUX FRACTURES

L'approche stochastique fournit une panoplie de modèles de réseaux de fractures, apte à rendre compte de situations très variées, même si bien sûr on peut toujours trouver des sites et des applications demandant de concevoir de nouveaux modèles. La caractérisation d'un réseau de fractures reste toutefois une opération complexe du fait du caractère très fragmentaire des données. En particulier, dès que l'on passe à des échelles plus larges que celles d'un affleurement, il n'est pas toujours légitime d'étendre les caractéristiques observées sur l'affleurement ou le long d'un forage à l'ensemble de la zone d'étude. Il faut alors s'appuyer sur des informations auxiliaires. Je me bornerai à trois points : la prise en compte de connaissances géomécaniques, le développement de modèles multiéchelles, ainsi que l'interprétation et l'inversion d'essais hydrauliques en termes de géométrie et de topologie du réseau des fractures hydrauliquement actives.

Incorporation des connaissances géomécaniques et géophysiques

Les travaux sur la fracturation présentés au chapitre précédent ont été essentiellement réalisés à l'échelle pluridécamétrique à hectométrique d'un affleurement où on dispose de données permettant d'estimer les caractéristiques statistiques du réseau. Lorsqu'on travaille à une échelle plus large, comme par exemple un réservoir pétrolier, le style de fracturation (failles, diaclases, fentes de tension, structures en compression comme les "deformation bands"), la densité de fracturation et l'orientation des structures peuvent présenter des variations d'une zone à l'autre du domaine d'étude, du fait de variations des propriétés de la roche ou des contraintes mécaniques. Comme on dispose rarement d'un affleurement dans chaque zone, il faut aller chercher ailleurs des informations sur les facteurs affectant la fracturation.

Notons tout d'abord que les modèles présentés jusqu'ici cherchent tous à représenter directement le réseau de fractures observé, sans passer par une modélisation mécanique. Une démarche radicalement différente consisterait à modéliser le processus de fracturation lui-même : partant d'une modélisation des propriétés de la roche (hétérogénéité, anisotropie, variabilité spatiale) et de l'historique des contraintes subies par le massif étudié, il s'agit de modéliser sa fracturation progressive et l'évolution des contraintes. Cette démarche est intellectuellement plus satisfaisante, et permet en principe, de par son caractère dynamique, de prévoir l'évolution future du système. Elle a motivé l'observation détaillée de systèmes de fractures naturelles (Segall et Pollard, 1983, pour des joints ; Christiansen et Pollard, 1997, pour des failles) ainsi que de nombreuses expériences de laboratoire sur des modèles réduits réalisés avec des vernis (Rives et Petit, 1990), du sable et des silicones (Sornette et al., 1990) ou des argiles (An, 1998 ; Walmann, 1998).

Parallèlement ont été développés des codes d'éléments finis qui permettent une modélisation déterministe de la déformation ou de la rupture, et plus particulièrement du développement de fractures en fonction des propriétés de la roche, des conditions aux limites et des sollicitations ; leur domaine d'application reste néanmoins d'extension limitée et concerne le plus souvent le développement de fractures consécutivement à la réalisation d'ouvrages souterrains (Kuijpers, 1995), ou le développement d'une fracture complexe comme des joints en échelons (Weinberger et al., 1999). La transposition de ces approches à la modélisation de la fracturation aux échelles d'espace et de temps qui nous intéressent se heurte à de grandes difficultés pratiques qui sont loin d'être résolues, et notamment à la modélisation des hétérogénéités de la roche, à la relation entre contrainte et déformation ou rupture en fonction de ces propriétés, ainsi qu'à la modélisation du champ des contraintes passées, de son évolution et des conditions aux limites.

Pour s'affranchir de ces difficultés ont été développés divers modèles où le milieu intact est représenté par un réseau régulier 2D ou 3D de ressorts, barres ou fusibles de caractéristiques mécaniques variables, et où le processus de fracturation est schématisé par la détérioration ou la suppression de certains éléments (Meakin, 1987; Colina et al., 1993) ; une autre approche consiste à simuler la fracturation à des échelles emboîtées par une technique de renormalisation (Allègre et Le Mouél, 1994). Ces modèles présentent l'intérêt d'inclure par construction les relations entre les diverses fractures. Toutefois il ne paraît pas simple de choisir un modèle et des paramètres conduisant à des simulations en accord avec un affleurement observé. Signalons enfin l'approche de Liu et al. (2002) qui simulent la croissance des fractures à partir de statistiques multipoints obtenues sur une image d'entraînement, sans modélisation préalable, avec les avantages et les limitations de ce genre d'approche.

Sans aller jusqu'à une solution "tout mécanique", la modélisation stochastique d'un champ de fractures réel a tout à gagner à incorporer les connaissances géomécaniques. Plusieurs auteurs, comme Cacas et al. (1997), Gringarten (1997) et Bourne et al. (2000a, b), ont développé des modèles simplifiés d'évolution qualitative ou quantitative des paramètres du réseau de fractures, fondés sur des analyses structurales et géomécaniques. Le contexte géologique est supposé relativement simple : milieu stratifié à bancs subhorizontaux, failles majeures subverticales connues, fractures subverticales créées suite à la mise en place des failles. La méthode consiste – avec bien sûr des variantes selon les auteurs – à déterminer, par une modélisation numérique géomécanique par éléments finis, le champ de contrainte résultant de la courbure des strates et de la mise en place des grandes failles, à en déduire les zones où ont pu se créer des fractures en mode I (joints) ou en mode II (petites failles) ainsi

que leur direction moyenne, et à simuler le développement du réseau de fractures conditionnellement à ces informations.

On s'intéresse actuellement à des milieux plus complexes que les milieux stratifiés, comme les carbonates. On dispose par ailleurs de données sismiques de plus en plus riches, qui apportent une information sur l'évolution spatiale de la direction des fractures et de la densité de fracturation. Des méthodes de simulation restent donc à affiner et d'autres à développer. Elles couplent une modélisation semi-quantitative des paramètres locaux du réseau de fractures à partir des informations secondaires comme la sismique, et une simulation stochastique des fractures. Concernant le premier point, signalons le travail d'Escuder Viruete et al. (2003) : au prix sans doute de quelques approximations dans le modèle bivariable (tout n'est pas décrit dans leur article), ils réalisent une simulation de l'indice de fracturation d'un massif granitique conditionnellement aux mesures obtenues le long des forages ainsi que de la vitesse sismique obtenue par tomographie. Parmi les méthodes de simulation des fractures une fois la densité de fracturation fixée, celles qui consistent à construire progressivement les fractures selon des règles mécaniques simplifiées, en mettant à jour au fur et à mesure le champ de contrainte, et qu'on pourrait qualifier de génético-stochastiques, paraissent séduisantes. Dans tous les cas, un travail important est de développer des méthodes d'identification des paramètres locaux du modèle en fonction de données sur affleurement ou en forage ou en fonction d'informations auxiliaires. Et si la simulation du réseau une fois connus ces paramètres est en général aisée, reste encore à proposer des algorithmes de construction de simulations conditionnelles.

Comportement multiéchelle

Dans nombre d'applications, et notamment en modélisation hydrogéologique, on a besoin d'un modèle à large maille en périphérie de la zone d'étude, et à maille fine au voisinage des ouvrages (forage, site de stockage). D'où l'intérêt de modèles de réseaux de fractures multiéchelles.

Les modèles dits fractals ont été assez largement étudiés, car on peut aisément définir un modèle reposant sur un nombre restreint de paramètres et étudier ses propriétés. Mais un tel modèle est-il à même de représenter la réalité ? Pas toujours en tous cas, puisqu'on a vu que les grès du Saq n'ont pas le même aspect à toutes les échelles. Une autre étude multiéchelle (Odling, 1997a), concernant les grès de Hornelen en Norvège, montre également que les différentes échelles ne sont pas similaires, même si dans ce cas les histogrammes cumulés des longueurs des traces, exprimés en échelle bilogarithmique, sont à chaque échelle à peu près linéaires.

Peacock (1996) présente de même plusieurs sites où le réseau des failles est organisé différemment selon l'échelle considérée. Il note que ces résultats confortent ceux de Hatton et al. (1994), pour qui les lois de changement d'échelle sont contrôlées par des facteurs mécaniques comme la taille des grains et l'épaisseur des bancs. Il conclut comme ces auteurs que les lois d'invariance souvent utilisées (à savoir un comportement auto-similaire ou auto-affine, caractérisé par des lois puissances) n'ont pas un caractère universel et ne doivent être employées qu'entre des limites bien définies.

Il reste donc un large champ pour le développement de modèles multiéchelles. Compte tenu qu'on ne cherche à raffiner que localement, il faut partir du réseau à échelle grossière pour aller vers le modèle à échelle fine. Cela suppose de définir comment les caractéristiques

d'une fracture vue de très loin se précisent quand on s'en approche, quelles nouvelles familles apparaissent – ou disparaissent – quand on passe d'une échelle d'acquisition à une échelle plus fine, comment évolue la connectivité du réseau, etc. Les modèles seront différents selon que la fracturation est contrôlée par des unités mécaniques (grès du Saq), ne l'est pas (grès de Hornelen), ou ne se limite pas à des directions horizontales et verticales (granites).

La première tâche consistera à développer des méthodes d'analyse de l'évolution du réseau observé d'une échelle à l'autre. La spécification de modèles multiéchelles, la détermination de leurs paramètres et leur simulation viendront ensuite.

Interprétation des essais hydrauliques et inversion

Des méthodes de calcul des écoulements de fluides dans le réseau des fractures et éventuellement dans la matrice ont été développées. Comme on a rarement directement accès aux conductivités hydrauliques des fractures ou des chenaux les idéalisant, ces méthodes permettent par exemple de caler la distribution des conductivités hydrauliques à partir de mesures du débit naturel sur les parois d'une galerie. Elles permettent ensuite d'évaluer dans quelle mesure le milieu fracturé se comporte à une échelle donnée comme un milieu continu.

Une autre source essentielle d'information est celle des essais hydrauliques. En effet un essai hydraulique fait d'abord intervenir le champ proche du point d'injection ou de soutirage puis le champ lointain. Il apporte donc d'abord une information sur la position et l'activité hydraulique des fractures qui intersectent la zone testée, puis sur la connectivité hydraulique du réseau et la perméabilité globale du champ lointain. Cette information est d'autant plus intéressante que les données d'affleurement n'apportent pas d'information fiable à ce sujet ; en effet, du fait notamment de la faible contrainte exercée par les terrains sus-jacents à proximité de la surface, la proportion des fractures ouvertes y est bien plus grande qu'en profondeur. Les essais hydrauliques donnent également des informations sur des paramètres géométriques comme la taille moyenne des fractures, auxquels on ne peut pas accéder directement lorsqu'on ne dispose que d'observations en forage. Ces essais doivent donc être exploités non seulement pour la détermination des paramètres hydrauliques, mais également pour tout ce qu'ils apportent concernant la géométrie et la topologie du réseau de fractures.

Plusieurs auteurs ont développé des modèles de milieu poreux / fracturé permettant d'interpréter de tels essais. Le modèle de Karasaki (1986) comporte deux auréoles autour du puits : dans l'auréole centrale, les écoulements sont limités aux fractures conductrices qui recoupent le puits ; ils sont monodimensionnels ou bidimensionnels selon le type de fracture (écoulement chenalisé ou dans tout le plan de la fracture) ; dans l'auréole externe, l'écoulement implique l'ensemble du réseau et est de dimension supérieure (bidimensionnel ou tridimensionnel).

Barker (1988) préfère caractériser l'écoulement au voisinage d'un puits d'injection par une dimension qui mesure l'évolution de la conductivité en fonction de la distance à la source. Cette dimension, non nécessairement entière, prend une valeur unique pour toutes les échelles, comprise entre 0 (aucun écoulement) et 3 (milieu parfaitement poreux). Lors d'essais à débit constant dans un milieu infini, le système tend vers un régime permanent si et seulement si sa dimension d'écoulement est strictement supérieure à 2. Billaux (1990) adapte l'approche de Barker à un écoulement chenalisé : l'écoulement est monodimensionnel

dans chaque chenal, mais le réseau des chenaux est caractérisé par une dimension de connectivité non entière. Les résultats présentés (source ponctuelle, débit constant, régime permanent) montrent que dans ce cas la dimension d'écoulement est égale à la dimension de connectivité.

Pour traiter le cas où la perméabilité de la matrice ne peut pas être négligée, Hamm et Bidaux (1996) étendent la méthodologie de Barker à des modèles à double porosité ; les forages de pompage et d'observation peuvent être situés dans les blocs de la matrice aussi bien que dans le système des fissures.

Des méthodes d'interprétation de divers types d'essais hydrauliques ont été mises au point dans le cadre de ces modèles. Pour tirer parti au mieux des essais hydrauliques on peut procéder en deux étapes : d'abord en analysant numériquement la réponse hydraulique de quelques modèles de réseaux de fractures particulièrement représentatifs des contextes auxquels on s'intéresse ; ensuite en examinant quelle information l'interprétation d'un essai de puits réel nous apporte quant à la pertinence du recours à tel ou tel modèle de réseau et au choix de ses paramètres.

Dans l'application à un site réel, il peut être important de savoir simuler un réseau tridimensionnel qui respecte aussi précisément que possible l'essai de puits. Celui-ci définit en particulier quelles fractures sont réellement conductrices, c'est-à-dire ouvertes et connectées au réseau hydrauliquement actif. Il s'agit alors de développer des méthodes de simulation conditionnelle respectant cette information, et notamment assurant que certaines fractures recoupées par un forage sont suffisamment prolongées ou environnées d'autres fractures pour être connectées au réseau actif. Dans le cadre de modèles booléens, on peut aisément imaginer satisfaire ce type de contrainte par une méthode itérative. Le problème est plus ardu pour d'autres modèles mais mérite qu'on y travaille.

La solution au problème précédent constitue une inversion de données hydrauliques en terme de géométrie du réseau des fractures ouvertes. Une inversion plus complète, incluant la détermination des conductivités hydrauliques des fractures au voisinage du puits, est bien sûr plus complexe mais pourrait aussi être envisagée en recourant à des méthodes itératives. Une autre source de données est celle des mesures géophysiques, notamment la tomographie qui définit en 3D – et non seulement le long d'un forage – quelles zones sont plus intensément fracturées. Les méthodes de simulation devront aussi être élargies à leur prise en compte.

3.6. EN GUISE DE CONCLUSION

Comme cela a déjà été souligné, dans les domaines d'application de la géostatistique le recours à des modèles probabilistes n'implique pas une foi en un Hasard qui régenterait le monde, mais provient simplement du constat que des phénomènes complexes et hétérogènes ne peuvent être décrits correctement par des lois déterministes et qu'une approche probabiliste permet des prévisions meilleures et assorties d'une quantification des incertitudes. Le développement constant de nouvelles méthodes de mesure et la compréhension toujours plus fine des processus physiques pourraient faire craindre que la géostatistique devienne inutile. Ainsi les méthodes géophysiques d'investigation 3D – voire 4D – du sous-sol pourraient remiser aux oubliettes les interpolations à partir de rares données de puits. En fait, si le nombre des données croît sans cesse, les nouvelles données sont le plus souvent des variables indirectes, ou qualitatives, dont le lien à la variable principale est plus ou moins complexe et dépend d'un modèle qui n'est connu que de façon

très approchée. Ceci ouvre de nouvelles perspectives à la géostatistique, à condition qu'elle sache proposer des réponses pertinentes aux problèmes posés. Si des réponses ad hoc doivent être parfois développées pour répondre aux besoins les plus urgents, un travail de fond est tout aussi nécessaire pour assurer les fondements des nouvelles méthodes.

Références

- Allègre, C.J., and J.L. Le Mouél (1994). Introduction of scaling techniques in brittle fracture of rocks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **87**, 85–93.
- An, L.J. (1998). Development of fault discontinuities in shear experiments. *Tectonophysics*, **293**, 45–59.
- Aug, C. (2003). Modélisation 3D par des méthodes géostatistiques : caractérisation de la covariance du champ de potentiel. Rapport de recherche, Centre de géostatistique, École des mines de Paris.
- Andersson, J., and B. Dverstorp (1987). Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures. *Water Resources Research*, **23**(10), 1876–1886.
- Armstrong, M., and A. Galli (2003). Sequential nongaussian simulations using the FGM Copula. Technical report, E.N.S. des Mines de Paris, <http://www.cerna.ensmp.fr/Documents/MA-AG-WPCopula.pdf>.
- Armstrong, M., A. Galli, G. Le Loc'h, F. Geffroy, and R. Eschard (2003). *Plurigaussian Simulations in Geosciences*. Springer, Berlin.
- Barker, J.A. (1988). A generalized radial flow model for hydraulic tests in fractured rock. *Water Resources Research*, **24**(10), 1796–1804.
- Bech, N., B. Bourguine, C. Castaing, J.P. Chilès, N.P. Christensen, P. Frykman, A. Genter, P.A. Gillespie, C. Høier, L. Klinkby, S. Lanini, H.F. Lindgaard, T. Manzocchi, M.F. Middleton, J. Naismith, N. Odling, A. Rosendal, P. Siegel, L. Thrane, R. Trice, J.J. Walsh, J. Wendling, K. Zinck-Jørgensen (2001). *Fracture Interpretation and Flow Modelling in Fractured Reservoirs*. Office for Official Publications of the European Communities, EUR 18946, Luxembourg.
- Bertino, L. (2001). *Assimilation de données pour la prédiction de paramètres hydrodynamiques et écologiques : cas de la lagune de l'Oder*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.
- Bertino, L., G. Evensen, and H. Wackernagel (2003). Sequential data assimilation techniques in oceanography. *International Statistical Review*, **71**(2), 223–241.
- Billiaux, D. (1989). Influence de la connectivité d'un réseau de fractures sur sa réponse à un essai de pompage. In *Rock at Great Depth*, V. Maury and D. Fourmaintraux, eds. Balkema, Rotterdam, Pays-Bas, 473–480.
- Billiaux, D. (1990). *Hydrogéologie des milieux fracturés. Géométrie, connectivité, et comportement hydraulique*. Thèse de docteur en hydrologie et hydrogéologie quantitatives, E.N.S. des Mines de Paris.
- Biver, P., A. Haas, and C. Bacquet (2002). Uncertainties in facies proportion estimation II: Application to geostatistical simulation of facies and assessment of volumetric uncertainties. *Mathematical Geology*, **34**(6), 703–714.
- Blès, J.L., et Y. Gros (1986). Genèse des failles dans les granites : postériorité des grandes failles par rapport à la petite fracturation. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II*, **303**(15), 1381–1386.

- Bourbiaux, B., M.C. Cacas, S. Sarda, and J.C. Sabathier (1998). A rapid and efficient methodology to convert fractured reservoir images into a dual-porosity model. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, **53(6)**, 785–799.
- Bourgine, B., J.P. Chilès, and P. Watremez (2001). Space-time modelling of sand beach data: A geostatistical approach. In *geoENV III – Geostatistics for Environmental Applications*, P. Monestiez, D. Allard, and R. Froidevaux, eds. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 101–111.
- Bourne, S.J., J.J. Ita, B.E. Kampman-Reinhartz, L. Rijkels, B.J. Stephenson, and E.J.M. Willemse (2000a). Integrated fractured reservoir modelling using geomechanics and flow simulation. *AAPG Bulletin*, 1395–1518.
- Bourne, S.J., F. Brauckmann, L. Rijkels, B.J. Stephenson, A. Weber, and E.J.M. Willemse (2000b). Predictive modelling of naturally fractured reservoirs using geomechanics and flow simulation. *Paper ADIPEC-0911*, Society of Petroleum Engineers.
- Cacas, M.C. (1989). Développement d'un modèle tridimensionnel stochastique discret pour la simulation de l'écoulement et des transferts de masse et de chaleur en milieu fracturé. Thèse de docteur en hydrologie et hydrogéologie quantitatives, E.N.S. des Mines de Paris.
- Cacas, M.C., J. Letouzey, et W. Sassi (1997). Modélisation multi-échelle de la fracturation naturelle des roches sédimentaires stratifiées. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II a*, **324**, 663–668.
- Carrera, J., and L. Martinez (1999) Discrete fractures-continuum mixed models: a summary of experiences in test interpretation and model predictions. In *Proceedings of the International Symposium on Dynamics of Fluids in Fractured Rocks—Concepts and Recent Advances—In Honour of Paul A. Witherspoon's 80th Birthday, February 10-12, 1999*, B. Faybishenko, ed. LBNL-42718, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, California, 87–88.
- Castaing, C., A. Genter, B. Bourguine, J.P. Chilès, J. Wendling, and P. Siegel (2002). Taking into account the complexity of natural fracture systems in reservoir single-phase flow modelling. *Journal of Hydrology*, **266(1-2)**, 83–98.
- Chilès, J.P. (1999). *Bibliographie sur l'approche stochastique des milieux fracturés*. Rapport BRGM R 40961, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- Chilès, J.P., and P. Delfiner (1999). *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York.
- Chilès, J.P., and S. Gentier (1993). Geostatistical modelling of a single fracture. In *Geostatistics Tróia '92*, A. Soares, ed. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, Vol. 1, 95–108.
- Chilès, J.P., and G. de Marsily (1993). Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. In *Flow and contaminant transport in fractured rock*, J. Bear, G. de Marsily, and C.F. Tsang, eds. Academic Press, San Diego, California, Chap. 4, 169–236.
- Chilès, J.P., F. Guérin, and D. Billaux (1992). 3D stochastic simulation of fracture network and flow at Stripa conditioned on observed fractures and calibrated on measured flow rates. In *Rock Mechanics*, J.R. Tillerson and W.R. Wawersik, eds. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 533–542.
- Chilès, J.P., B. Bourguine, C. Castaing, and A. Genter (2000). Stochastic modelling and simulation of fracture networks in petroleum and geothermal reservoirs. In *Geostatistics 2000 Cape Town*, W.J. Kleingeld and D.G. Krige, eds. Geostatistical Association of Southern Africa, Vol. 1, 413–423.
- Christiansen, P.P., and D.D. Pollard (1997). Nucleation, growth and structural development of mylonitic shear zones in granitic rock. *Journal of Structural Geology*, **19(9)**, 1159–1172.
- Colina, H., L. de Arcangelis, and S. Roux (1993). Model for surface cracking. *Physical Review B*, **48(6)**, 3666–3676.
- Conrad, F., et C. Jacquin (1973). Représentation d'un réseau bidimensionnel de fractures par un modèle probabiliste. Application au calcul des grandeurs géométriques des blocs matriciels. *Revue de l'I.F.P.*, **28(6)**, 843–890.
- Cressie, N.A.C., and H. Huang (1999). Classes of nonseparable, spatio-temporal stationary covariance functions. *Journal of the American Statistical Association*, **94(448)**, 1330–1340.

- De Iaco, S., D. Myers, and D. Posa (2002). Nonseparable space-time covariance models: Some parametric families. *Mathematical Geology*, **34**(1), 23–42.
- Douglas, J., and T. Arbogast (1990). Dual porosity models for flow in naturally fractured reservoirs. In *Dynamics of Fluids in Hierarchical Porous Media*, J.H. Cushman, ed. Academic Press, London, 177–220.
- Escuder Viruete, J., R. Carbonnel, D. Marti, M.J. Jurado, and A. Pérez-Estaún (2003). Architecture of fault zones determined from outcrop, cores, 3-D seismic tomography and geostatistical modeling: example from the Albalá Granitic pluton, SW Iberian Variscan Massif. *Tectonophysics*, **361**, 97–120.
- Gandin, L.S. (1963). *Ob'ektivnyi analiz meteorologicheskikh polei*. Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo, Leningrad. English translation (1965): *Objective analysis of meteorological fields*. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem.
- Genter, A., C. Castaing, B. Bourguine, and J.P. Chilès (1997). An attempt to simulate fracture systems from well data in reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**(3/4), p. 448, Paper No. 44. Full length paper on CD-ROM (K. Kim, ed.).
- Gentier, S. (1986). *Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans un granite sous contrainte normale*. Thèse de doctorat d'Université, Université d'Orléans ; Document du BRGM, No. 134, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.
- Gentier, S., J.P. Chilès, et J. Riss (1991). Analyse et simulation d'une surface de fracture rocheuse. *Cahiers de Géostatistique*, Fasc. 1, E.N.S. des Mines de Paris, 77–87.
- Geraets, D. (2002). *Modélisation stochastique de champs de vitesse géophysique en exploration pétrolière*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.
- Gervais, F. (1993). *Modélisation géométrique d'un réseau de fractures dans un massif rocheux stratifié. Application aux carrières marbrières de Comblanchien (Côte d'Or, France)*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.
- Gneiting, T. (2002). Nonseparable, stationary covariance functions for space-time data. *Journal of the American Statistical Association*, **97**(458), 590–600.
- Gringarten, E. (1997). 3-D geometric description of fractured reservoirs. In *Geostatistics Wollongong '96*, E.Y. Baafi and N.A. Schofield, eds. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, Vol. 1, 424–432.
- Guardiano, F.B., and R.M. Srivastava (1993). Multivariate geostatistics: Beyond bivariate moments. In *Geostatistics Tróia '92*, A. Soares, ed. Kluwer, Dordrecht, Netherlands, Vol. 1, 133–144.
- Guyonnet, D., B. Bourguine, D. Dubois, H. Fargier, B. Côme, and J.P. Chilès (2003). Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, **129**(1), 68–78.
- Haas, A., and P. Formery (2002). Uncertainties in facies proportion estimation I. Theoretical framework: The Dirichlet distribution. *Mathematical Geology*, **34**(6), 679–702.
- Hamm, S.Y., and P. Bidaux (1996). Dual-porosity fractal models for transient flow analysis in fissured rocks. *Water Resources Research*, **32**(9), 2733–2745.
- Hatton, C.G., I.G. Main, and P.G. Meredith (1994). Non-universal scaling of fracture length and opening displacement. *Nature*, **367**, 160–162.
- Høst, G., H. Omre, and P. Switzer (1995). Spatial interpolation errors for monitoring data. *Journal of the American Statistical Association*, **90**(431), 853–861.
- Iooss, B. (1998). *Tomographie statistique en sismique réflexion : estimation d'un modèle de vitesse stochastique*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.
- Joe, H. (1997). *Multivariate models and dependence concepts*. Chapman & Hall, Boca Raton, Florida.
- Karasaki, K. (1986). *Well test analysis in fractured media*. Ph.D. thesis, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.

RÉFÉRENCES

- Kondor, R.I., and J. Lafferty (2002). Diffusion kernels on graphs and other discrete input spaces. In *Proceedings of the 19th International Conference on Machine Learning (ICML-2002)*, Sydney, Australia, 8-12 July 2002, 315–322.
- Kuijpers, J. S. (1995). Numerical simulation of failure processes in brittle rock. In *Fractured and Jointed Rock Masses*, L.R. Myer, N.G.W. Cook, R.E. Goodman, and C.F. Tsang, eds. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 687–694.
- Kyriakidis, P.C., and A.G. Journel (1999). Geostatistical space-time models: A review. *Mathematical Geology*, **31**(6), 651–684.
- Lajaunie, C., G. Courrioux, and L. Manuel (1997). Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation. *Mathematical Geology*, **29**(4), 571–584.
- Lantuéjoul, C. (2002). *Geostatistical Simulation. Models and Algorithms*. Springer, Berlin.
- Liao, H.T. (1990). *Estimation des réserves récupérables des gisements d'or—Comparaison entre krigeage disjonctif et krigeage des indicatrices*. Doctoral thesis, Université d'Orléans; Document du BRGM, No. 202 (1991), Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- Liu, X., S. Srinivasan, and D. Wong (2002). Geological characterization of naturally fractured reservoirs using multiple point geostatistics. *SPE paper 75246*, SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa, Oklahoma, 13-17 April 2002, 12 p.
- Loiseau, P. (1987). *Etude structurale et géostatistique des gneiss de la région du Cézallier: Modélisation tridimensionnelle de réseaux de fractures; application à l'écoulement des fluides*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans; Document du BRGM, No. 162 (1988), Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- Lopez, S. (2003). *Modélisation génétique et stochastique de réservoirs chenalisés méandriformes*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.
- Marache, A. (2002). *Comportement mécanique d'une fracture rocheuse sous contraintes normale et tangentielle*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale des Arts et Manufactures, Chatenay-Malabry.
- Marache, J. Riss, S. Gentier, and J.P. Chilès (2002). Characterization and reconstruction of a rock fracture surface by geostatistics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **26**, 873–896.
- Massoud, H. (1987). *Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris; Document du BRGM, No. 155 (1988), Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.
- Meakin, P. (1987). A simple model for elastic fracture in thin films. *Thin Solid Films*, **151**, 165–190.
- Odling, N.E. (1997a). Scaling and connectivity of joint systems in sandstones from western Norway. *Journal of Structural Geology*, **19**(10), 1257–1271.
- Odling, N.E. (1997b). Fluid flow in fractured rocks at shallow levels in the Earth's crust: an overview. In *Deformation-enhanced Fluid Transport in the Earth's Crust and Mantle*, M.B. Holnes, ed. Chapman & Hall, London, ch. 11, 289–320.
- Ouillon, G. (1995). *Application de l'analyse multifractale et de la transformée en ondelettes anisotropes à la caractérisation géométrique multi-échelle des réseaux de failles et de fractures*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis. Documents du BRGM, No. 246, Editions BRGM, Orléans.
- Peacock, D.C.P. (1996). Field examples of variations in fault patterns at different scales. *Terra Nova*, **8**, 361–371.
- Rives, T., et J.P. Petit (1990). Diaclases et plissements : une approche expérimentale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série II*, **310**, 1115–1121.
- Roth, C. (1995). *Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris; Document du BRGM, No. 241, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.

RÉFÉRENCES

- Sampson, P.D., D. Damian, and P. Guttorp (2001). Advances in modeling and inference for environmental processes with nonstationary spatial covariance. In *geoENV III – Geostatistics for Environmental Applications*, P. Monestiez, D. Allard, and R. Froidevaux (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 17–32.
- Segall, P., and D.D. Pollard (1983). Joint formation in granitic rock of the Sierra Nevada. *Geological Society of America Bulletin*, **94**, 563–575.
- Sénégas, J., H. Wackernagel, W. Rosenthal, and T. Wolf (2001). Error covariance modeling in sequential data assimilation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, **15**, 65–86.
- Smola, A.J., and R. Kondor (2003). Kernels and regularization on graphs. In *Proceedings of the 16th Annual Conference on Learning Theory and the 7th Kernel Workshop (COLT/KW 2003)*, Washington D.C., August 24–27, 2003, 144–158.
- Sornette, A., P. Davy, and D. Sornette (1990). Growth of fractal fault patterns. *Physical Review Letters*, **65**(18), 2266–2269.
- Strebelle, S. (2002). Conditional simulation of complex geological structures using multi-point statistics. *Mathematical Geology*, **34**(1), 1–21.
- Strebelle, S., and A.G. Journel (2001). Sequential simulation drawing structures from training images. In *Geostatistics 2000 Cape Town*, W.J. Kleingeld and D.G. Krige, eds. Geostatistical Association of Southern Africa, Vol. 1, 381–392.
- Touati, M. (1996). *Contribution géostatistique au traitement des données sismiques*. Thèse de doctorat, E.N.S. des Mines de Paris.
- Tsang, Y.W., and C.F. Tsang (1989). Flow channeling in a single fracture as a two-dimensional strongly heterogeneous permeable medium. *Water Resources Research*, **25**(9), 2076–2080.
- Tsang, Y.W., and C.F. Tsang (1990). Hydrological characterization of variable-aperture fractures. In *Rock Joints*, N. Barton and O. Stephansson, eds. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 423–431.
- Walmann, T. (1998). *Dynamics and Scaling Properties of Fractures in Clay-Like Materials*. Ph.D. thesis, University of Oslo, Norway.
- Warren, J.E., and P.J. Root (1963). The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, **3**, 245–255.
- Weinberger, R., V. Lyakhovsky, and A. Agnon (1999). Damage evolution and propagation paths of en-échelon cracks. In *Rock Mechanics for Industry*, B. Amadei, R.L. Kranz, G.A. Scott, and P.H. Smeallie, eds. Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol. 2, 1125–1132.

CURRICULUM VITÆ

Jean-Paul CHILÈS

11 bis, allée de Flandres-Dunkerque 45650 Saint-Jean-le-Blanc Tél. : 02 38 56 46 49 (domicile) 01 64 69 47 86 (bureau) Mél. : jean-paul.chiles@ensmp.fr	57 ans né à Metz le 13.02.1947 nationalité française marié 3 enfants
---	--

SYNTHÈSE

Parcours professionnel

Depuis avril 2002 : *École des mines de Paris* : directeur du Centre de géostatistique

1979 à mars 2002 : *BRGM* :

- 1994-2002 : géostatisticien senior, chef de projet de recherche
- 1988-1993 : géostatisticien senior, responsable d'une unité de géostatisticiens et modélisateurs
- 1985-1987 : expert géostatisticien, coordonnateur des activités de recherche scientifique au sein du département chargé des applications géostatistiques ; invité scientifique au LBL en 1986-87 (10 semaines)
- 1979-1984 : expert géostatisticien

1971-1979 : *ARMINES* : ingénieur de recherche au Centre de géostatistique

1970-1971 : *SHOM* : service national comme scientifique

Compétences acquises

- direction d'une unité de recherche
- conduite de projets de recherche (géostatistique, modélisation 3D, aide à la décision)
- conduite d'opérations commerciales (études, développement scientifique et informatique)
- recherche scientifique en géostatistique (méthodologie, hydrogéologie, environnement, logiciels)
- développement d'un nouveau domaine d'application de la géostatistique (milieux fracturés)
- études géostatistiques (gisements miniers, projets de génie civil – tunnel sous la Manche)
- direction ou tutorat de thèse
- enseignement : CEEC short course ; cours au CESTEMIN et au CESEV
- rédaction d'un ouvrage de référence en géostatistique

Formation supérieure

- ingénieur civil des mines, École des mines de Paris (1970)
- docteur-ingénieur, Université de Nancy I (1977)

Langues

Français, anglais, allemand

Ouvrages

- J.P. Chilès & P. Delfiner, 1999: *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Wiley, New York, 695 p.
- J.P. Chilès & G. de Marsily, 1993: Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. In *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, J. Bear, G. de Marsily, and C.F. Tsang, eds. Academic Press, San Diego, California, Chap. 4, 169–236.

CV DÉTAILLÉ

FORMATION SUPÉRIEURE

- 1977 Docteur-ingénieur, Université de Nancy I.
Thèse : *Géostatistique des phénomènes non stationnaires*.
- 1970 Ingénieur civil des mines, École nationale supérieure des mines de Paris.

CARRIÈRE PROFESSIONNELLE

Depuis avril 2002 : École des mines de Paris

Directeur du Centre de géostatistique, Fontainebleau

- conduite du Centre, dans ses activités d'enseignement, de formation et de recherche scientifique : définition des orientations, recherche de cofinancements, organisation et gestion ;
- travaux de recherche, notamment en modélisation probabiliste de milieux fracturés et en modélisation géologique 3D ;
- enseignement : cours de géostatistique du CESTEMIN et du CESEV (cycles de formation spécialisée du CESMAT à l'École des mines de Nancy).

Le Centre de géostatistique de l'École des Mines / ARMINES comprend une trentaine de personnes dont 15 enseignants-chercheurs permanents et 12 doctorants et post-doctorants. Il assure des enseignements du cycle des ingénieurs civils de l'École des mines et de DEA ainsi qu'une formation destinée à des ingénieurs étrangers (CFSG, un cycle du CESMAT). Il réalise des travaux de recherche scientifique, essentiellement sur contrat (près de 1 M€ par an). Ses principaux domaines d'application sont la mine, la modélisation géologique, le pétrole, l'halieutique, l'environnement et la bioinformatique.

Principaux travaux de recherche

- Définition et prédiction de la densité de fracturation (contrat CEA, 2003).
- Traitement statistique de microstructures tectoniques (contrat ANDRA, 2003).
- Modélisation géologique 3D par des méthodes géostatistiques (contrat BRGM, 2002-2004).

1979-2002 BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières)**1994-2002** Département Géophysique et Imagerie Géologique, Dir. de la Recherche (1994-1999), puis Unité Modélisation et Applications (1999-2002)*Géostatisticien senior, chef de projet*

- conduite de projets de recherche en modélisation 3D à finalité géologique, hydrogéologique ou environnementale ;
- travaux de recherche, notamment pour la modélisation probabiliste de milieux fracturés : réservoirs pétroliers ou géothermiques, sites potentiels de stockage de déchets radioactifs.

1979-1993 Département Informatique Scientifique Appliquée

- *Expert en géostatistique* : études et recherches dans de multiples domaines des géosciences : mine, géotechnique, géothermie, géophysique, hydrogéologie.

- *Adjoint au chef de département* (à partir de 1985), plus particulièrement chargé de la coordination des activités de recherche scientifique.
- *Responsable de la section Études* créée au sein du département (1988) : coordination des études scientifiques et commerciales concernant la géostatistique et ses applications, la modélisation 3D des formations géologiques, le calcul des réserves, ainsi que les développements logiciels dans ces domaines.
- *Scientifique invité au LBL* (Lawrence Berkeley Laboratory) en 1986 et en 1987 (10 semaines en tout) : travaux sur la modélisation des granites fracturés.

Principales références d'études et travaux

Conduite de projets de recherche

- COPGEN : méthodologie de l'inventaire du potentiel géothermique métropolitain, montage de projet ADEME-BRGM (2001–2002).
- Géomodèles 3D : modélisation géométrique 3D, développement logiciel (2000–2002).
- OMEGA : projet européen ESPRIT de réalisation d'un environnement de développement d'applications géoscientifiques (1997–1999).
- Modélisation 3D du sous-sol : modélisation géométrique et topologique, interpolation et simulation 3D, inversion géophysique, modélisation des réservoirs fracturés (1997–1998).
- Aide à la décision en matière de gestion de ressources géologiques et hydrogéologiques, de prévention, d'exploration minière et de géo-ingénierie : cartographie décisionnelle, prise en compte des incertitudes, raisonnement qualitatif, analyse de robustesse (1996).
- Simulation des milieux géologiques hétérogènes (1994–1995).
- DEEP : projet européen BRITE-EURAM de développement d'un environnement informatique pour les projets d'exploration et d'exploitation minières (1994–1995).
- Approche géostatistique du problème inverse en hydrogéologie (tutorat d'une thèse ; 1992–1994).
- Évaluation géostatistique des réserves récupérables de gisements d'or (direction d'une thèse ; 1988–1990).
- Modélisation stochastique de réseaux de fractures (tutorat de thèses ; 1984–1992).

Travaux de recherche

- Fusion télédétection / mesures aéroportées.
- Combinaison flou / probabiliste.
- Modélisation de l'évolution du littoral.
- Modélisation stochastique 3D de réservoirs fracturés en milieu sédimentaire.
- Modélisation 3D de réseaux de fractures dans les granites et les gneiss.
- Caractérisation de la topographie d'une fracture.
- Développement de nouvelles méthodes de simulation géostatistique.
- Développement d'algorithmes géostatistiques pour des problèmes d'analyse structurale, d'estimation 2D et 3D, de calcul de réserves récupérables.

Géostatistique appliquée aux sciences de la Terre

- Géotechnique : modélisation de la géométrie des formations géologiques pour le projet de tunnel sous la Manche, à partir des données bathymétriques et sismiques.
- Environnement : modélisation de la fracturation dans l'étude de sites de stockage.
- Hydrogéologie : optimisation d'un réseau piézométrique de surveillance.

- Géothermie : établissement d'un modèle tridimensionnel de la température du sous-sol du Bassin Parisien.
- Géophysique : séparation d'un champ de potentiel en anomalies régionale et locale.

Études de géostatistique minière

- Études de géostatistique minière classique relatives à divers types de gisements et de substances (fluorine, nickel, or, potasse).
- Évaluation des réserves récupérables de gisements d'or.
- Simulation conditionnelle de divers gisements (fluorine, nickel, or).

Informatique scientifique

- Conception et développement de logiciels de géostatistique 2D et 3D (variographie, krigeage, simulations) : module GEORES du progiciel GDM.

Projets miniers

- Étude économique d'un gisement de tungstène.

1971–1979 ARMINES (École des mines de Paris)

Ingénieur de recherche en géostatistique

Études et recherches

Application de la géostatistique à des domaines variés : topographie, bathymétrie, météorologie, pollution atmosphérique, géophysique, hydrocarbures ; en particulier :

- contribution à la conception et à la mise au point d'une chaîne expérimentale d'analyse météorologique ;
- développement d'un système de cartographie de données bathymétriques affectées d'une forte incertitude de localisation ;
- développement de méthodes d'inférence statistique automatiques.

Informatique scientifique

Conception et réalisation, en partie ou en totalité, des logiciels KRIGEPACK (pour SNPA et CFP), BLUEPACK (krigeage) et SIMPACK (simulations conditionnelles).

Activité d'enseignement

École d'été de géostatistique.

1970–1971 SHOM (Service hydrographique et océanographique de la marine)

Service national en tant que scientifique : conception et développement d'une chaîne de classification de profils bathythermiques.

ENSEIGNEMENT

- CEEC short course "Geostatistics in Civil Engineering" (Leuven, 1993).
- CESTEMIN et CESEV : cours de géostatistique (Nancy, 2000, 2001, 2002, 2003).

ANIMATION SCIENTIFIQUE

- **Direction ou tutorat de thèse**

- Hamid Massoud : cotutelle, avec Philippe Weber, d'une thèse de l'École des mines de Paris "Modélisation de la petite fracturation par les techniques de la géostatistique", École des mines d'Alès / BRGM, 1984–1987.
Devenir : créateur de sa propre entreprise de service à l'industrie des carrières.
- Philippe Loiseau : cotutelle, avec Jean-Louis Blès, d'une thèse de l'Université d'Orléans "Étude structurale et géostatistique des gneiss de la région du Cézallier : modélisation tridimensionnelle de réseaux de fractures ; application à l'écoulement des fluides", BRGM, 1985–1987.
Devenir : responsable organisation à BNP Paribas.
- Marc Urvois : cotutelle, avec Pierre Watremez, d'une thèse de l'Université d'Orléans "Apports de l'estimation géostatistique de l'épaisseur des unités métallifères dans la compréhension des mécanismes de mise en place des sédiments de la fosse Atlantis II (Mer Rouge)", BRGM, 1985–1987.
Devenir : chef d'unité au BRGM.
- Fabrice Gervais : cotutelle, avec Sylvie Gentier, d'une thèse de l'École des mines de Paris "Modélisation géométrique d'un réseau de fractures dans un massif rocheux stratifié – Application aux carrières marbrières de Comblanchien (Côte d'Or, France)", BRGM, 1987–1990.
Devenir : chef de projet dans une société d'exploitation de sablières.
- Hong-Tao Liao : direction d'une thèse de l'Université d'Orléans "Estimation des réserves récupérables des gisements d'or – Comparaison entre krigeage disjonctif et krigeage des indicatrices", BRGM, 1990–1993.
Devenir : chef de projet à Canal +.
- Chris Roth : cotutelle, avec Chantal de Fouquet, d'une thèse de l'École des mines de Paris "Contribution de la géostatistique à la résolution du problème inverse en hydrogéologie", BRGM, 1992–1995.
Devenir : responsable du service études à AirParif.
- Christophe Aug : direction d'une thèse de l'École des mines de Paris "Modélisation géologique 3D par la méthode des champs de potentiel", École des mines de Paris, 2002–2004.

- **Jury de thèse : 25 dont 10 comme rapporteur :**

- École des mines de Paris,
- École des mines de Saint-Étienne,
- Institut national polytechnique de Lorraine,
- Université de Bordeaux,
- Université d'Orléans,
- Université Pierre & Marie Curie,
- Université du Québec,
- University of Western Australia.

- **Relecture d'article pour des revues ou des congrès :**

- *Agronomie*,
- *Annales Geophysicae*,
- *Chronique de la Recherche Minière*,
- *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*,
- *Computers & Geosciences*,
- *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*,
- *Journal of Computational Physics*,
- *Journal of Geophysical Research*,

- *Journal of Multivariate Analysis*,
- *Journal of Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*,
- *Mathematical Geology*,
- *Rock Mechanics and Rock Engineering*,
- *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*,
- *Transport in Porous Media*,
- *Water Resources Research*,
- Congrès geoENV,
- Congrès internationaux de géostatistique,
- Journées de géostatistique,
- Ontario Power generation.

• **Relecture d'ouvrage pour des éditeurs :**

- Geological Society of America,
- Kansas Geological Survey,
- Presses de l'École des Mines de Paris.

• **Évaluation de demande de subvention de recherche :**

- CRSNG/NSERC (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada),
- FCAR (Fonds pour la Formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche, Québec),
- U.S. Army Research Office,
- Science Foundation Ireland.

• **Évaluation de demande de nomination :**

- University of Washington, Department of Statistics.

• **Conférencier invité :**

- à congrès : Geostats, geoENV, IMSC, Kyoto Underground Environment ;
- hors congrès : Lawrence Berkeley Laboratory, Université du Québec, SAID, SFRP, ETH Zurich, IPSN, SFdS, INSEE, Instituto de Ingenieros de Minas de Chile, ENSG.

• **Sociétés scientifiques :**

- membre de l'International Association for Mathematical Geology ;
- membre de la Société française de statistiques ;
- membre du Comité français de mécanique des roches.

• **Conseils, comités :**

- membre du Conseil d'orientation du CFSG (1990–2002) ;
- membre du Comité des chercheurs du BRGM (1993-1997) ;
- membre du Conseil scientifique du Programme GéoFrance 3D (1994–1997) ;
- membre de comités scientifiques de congrès : IMA, geoENV (2004).

DIVERS

- Membre élu du Conseil d'administration du BRGM (1989-2002).
- Chevalier de l'Ordre national du mérite (2001).

PUBLICATIONS

Ouvrages, contribution à des ouvrages collectifs

- CHILÈS J.P., DELFINER P., 1999.- *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons, New York, 695 p.
- CHILÈS J.P., MARSILY G. DE, 1993.- Stochastic models of fracture systems and their use in flow and transport modeling. In *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock*, J. Bear, G. de Marsily, and C.F. Tsang (eds.), Academic Press, San Diego, California, Chap. 4, pp. 169-236.
- CHILÈS J.P., 1977.- *Géostatistique des phénomènes non stationnaires (dans le plan)*. Thèse de docteur-ingénieur, Université de Nancy I. Ecole des mines de Paris, Centre de géostatistique, Fontainebleau, 152 p.

Articles

- GUYONNET D., DUBOIS D., BOURGINE B., FARGIER H., CÔME B., CHILÈS J.P., 2003.- Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition aux polluants du sol. *Étude et Gestion des Sols*, Vol. 10, No. 4, pp 357-368.
- BAGHDADI N., BOURGINE B., CAVELIER S., CHILÈS J.P., KING C., DANIELS P., PERRIN J., TRUFFERT C., 2003.- Merging of airborne laser altimeter data and radarsat data to develop a digital elevation model. In *Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, J.A. Sobrino (ed.), Publications de la Universitat de València, Spain. Also: *International Journal of Remote Sensing*, accepted.
- CHILÈS J.P., 2003.- Geostatistical modeling and simulation of the underground. In *Environmental Rock Engineering*, T. Saito and S. Murata (eds.), A.A. Balkema Publishers, Lisse, The Netherlands, pp. 73-82.
- GUYONNET D., BOURGINE B., DUBOIS D., FARGIER H., CÔME B., CHILÈS J.P., 2003.- Hybrid approach for addressing uncertainty in risk assessments. *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 129, No. 1, pp 68-78.
- GENTER A., BOURGINE B., CASTAING C., CHILÈS J.P., GROS Y., 2002.- Réseaux types de fractures dans les granites et simulations géométriques en vue d'une modélisation des écoulements. In *Journée du Partenariat de Recherche et Développement entre le BRGM et l'ANDRA, Orléans, France, 5 mars 2002*, BRGM, Orléans, France, pp. 9-13.
- CASTAING C., GENTER A., BOURGINE B., CHILÈS J.P., WENDLING J., SIEGEL P., 2002.- Taking into account the complexity of natural fracture systems in reservoir single-phase flow modelling. *Journal of Hydrology*, Vol. 266, No 1-2, pp. 83-98.
- MARACHE A., RISS J., GENTIER S., CHILÈS J.P., 2002.- Characterization and reconstruction of a rock fracture surface by geostatistics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 26, pp. 873-896.
- MARACHE A., RISS J., GENTIER S., CHILÈS J.P., 2001.- Geostatistical modeling of rock fracture surfaces and simulation of shear tests. In *Rock Mechanics in the National Interest*, D. Elsworth, J.P. Tinucci, and K.A. Heasley (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 869-875.
- CHILÈS J.P., 2001.- On the contribution of hydrogeology to advances in geostatistics. In *geoENV III – Geostatistics for Environmental Applications*, P. Monestiez, D. Allard, and R. Froidevaux (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-16.
- BOURGINE B., CHILÈS J.P., WATREMEZ P., 2001.- Space-time modelling of sand beach data: A geostatistical approach. In *geoENV III – Geostatistics for Environmental Applications*, P. Monestiez, D. Allard, and R. Froidevaux (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 101-111.
- GUYONNET D., BOURGINE B., CHILÈS J.P., FARGIER H., CÔME, 2001.- Prise en compte de l'incertitude dans l'évaluation du risque d'exposition : Cas d'un site pollué par du Cd. In *Réunion "Industrie Minérale et Environnement, Paris, 5-6 février 2001*, 4 p.

- ODLING N.E., GILLESPIE P., BOURGINE B., CASTAING C., CHILÈS J.P., CHRISTENSEN N.P., FILLION E., GENTER A., OLSEN C., THRANE L., TRICE R., AARSETH E.S., WALSH J.J., WATTERSON J., 1999.- Variations in fracture system geometry and their implications for fluid flow in fractured hydrocarbon reservoirs. *Petroleum Geoscience*, Vol. 5, pp. 373-384.
- CASTAING C., BOURGINE B., CHILÈS J.P., GENTER A., 1998.- From joint and fault quantification to simulation of 3-D conceptual fracture models. In *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, H.P. Rossmanith (ed.), A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, pp. 145-149.
- CHILÈS J.P., BOURGINE B., CASTAING C., GENTER A., WENDLING J., 1998.- Caractérisation et simulation multiéchelles de réseaux de fractures de réservoirs pétroliers. *Cahiers de Géostatistique*, Fasc. 6, Ecole des Mines de Paris, pp. 105-116.
- ROTH C., CHILÈS J.P., FOUQUET C. DE, 1998.- Combining geostatistics and flow simulators to identify transmissivity. *Advances in Water Resources*, Vol. 21, No. 7, pp. 555-565.
- CASTAING C., GENTER A., CHILÈS J.P., BOURGINE B., OUILLON G., 1997.- Scale effects in natural fracture networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No 3/4, p. 389, paper no. 45. Full length paper on CD-ROM (K. Kim, ed.).
- GENTER A., CASTAING C., BOURGINE B., CHILÈS J.P., 1997.- An attempt to simulate fracture systems from well data in reservoirs. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 34, No 3/4, p. 448, paper no. 44. Full length paper on CD-ROM (K. Kim, ed.).
- ROTH C., CHILÈS J.P., 1997.- Modélisation géostatistique des écoulements souterrains : comment prendre en compte les lois physiques. *Hydrogéologie*, No. 1 (1997), pp. 23-32.
- BOURGINE B., GENTER A., CHILÈS J.P., CASTAING C., FILLION E., 1997.- An attempt to simulate fracture networks from borehole imagery in a clastic reservoir. In *Interim guide to fracture interpretation and flow modelling in fractured reservoirs*, European Commission, Directorate-General XII, EUR 17116 EN, Brussels Luxembourg, pp. 138-160.
- ROTH C., FOUQUET C. DE, CHILÈS J.P., MATHERON G., 1997.- Geostatistics applied to hydrogeology's inverse problem: taking boundary conditions into account. In *Geostatistics Wollongong '96*, E.Y. Baafi and N.A. Schofield (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 2, pp. 1085-1097.
- CHILÈS J.P., DELFINER P., 1997.- Discrete exact simulation by the Fourier method. In *Geostatistics Wollongong '96*, E.Y. Baafi and N.A. Schofield (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 1, pp. 258-269.
- ROTH C., CHILÈS J.P., FOUQUET C. DE, 1996.- Adapting geostatistical transmissivity simulations to finite differences flow simulators. *Water Resources Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 3237-3242.
- CHILÈS J.P., ROBIDA F., VAIRON J., JOUSSET N., ARPIN R., COLLIER D., STOKES P., GILLES M., TORE G., HASLETT J., 1996.- DEEP : un environnement informatique de nouvelle génération pour le traitement des données d'exploration et d'exploitation minières. *Chronique de la Recherche Minière*, No. 525, pp. 45-48.
- CASTAING C., HALAWANI M.A., GERVAIS F., CHILÈS J.P., GENTER A., BOURGINE B., OUILLON G., BROSSE J.M., MARTIN P., GENNA A., JANJOU D., 1996.- Scaling relationships in intraplate fracture systems related to Red Sea rifting. *Tectonophysics*, Vol. 261, pp. 291-314.
- CHILÈS J.P., BOURGINE B., NIANDOU I., 1996.- Designing an additional sampling pattern to determine the variogram at short distances. In *Proceedings of the Conference on Mining Geostatistics, Berg-en-dal, Kruger National Park, South Africa, 19-22 September 1994*, Geostatistical Association of South Africa, pp. 200-212.
- CHILÈS J.P., DELFINER P., 1996.- Using FFT techniques for simulating Gaussian random fields. In *Proceedings of the Conference on Mining Geostatistics, Berg-en-dal, Kruger National Park, South Africa, 19-22 September 1994*, Geostatistical Association of South Africa, pp. 131-140.
- CHILÈS J.P., BLANCHIN R., 1995.- Contribution of geostatistics to the control of the geological risk in civil-engineering projects: The example of the Channel Tunnel. In *Applications of Statistics and Probability—Civil Engineering Reliability and Risk Analysis*, M. Lemaire, J.L. Favre, and A. Mébarki (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, Vol. 2, pp. 1213-1219.

- BOURGINE B., CHILÈS J.P., LECOMTE P., CLOTTES P., 1995.- Application of geostatistics to the study and diagnosis of a site polluted with hydrocarbons. In *Applications of Statistics and Probability—Civil Engineering Reliability and Risk Analysis*, M. Lemaire, J.L. Favre, and A. Mébarki (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1995, Vol. 1, pp. 517-523.
- CHILÈS J.P., 1995.- Quelques méthodes de simulation de fonctions aléatoires intrinsèques. *Cahiers de Géostatistique*, Fasc. 5, Ecole des Mines de Paris, pp. 97-112.
- BOURGINE B., CHILÈS J.P., CASTAING C. 1995.- Simulation d'un réseau de fractures par un modèle probabiliste hiérarchique. *Cahiers de Géostatistique*, Fasc. 5, Ecole des Mines de Paris, pp. 81-96.
- GERVAIS F., CHILÈS J.P., GENTIER S., 1995.- Geostatistical analysis and hierarchical modelling of a fracture network in a stratified rock mass. In *Fractured and Jointed Rock Masses*, L.R. Myer, N.G.W. Cook, R.E. Goodman, and C.F. Tsang (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 153-159.
- CHILÈS J.P., LIAO H.T., 1993.- Estimating the recoverable reserves of gold deposits: comparison between disjunctive kriging and indicator kriging. In *Geostatistics Tróia '92*, A. Soares (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 2, pp. 1053-1064.
- BLANCHIN R., CHILÈS J.P., 1993.- Channel Tunnel: geostatistical prediction facing the ordeal of reality. In *Geostatistics Tróia '92*, A. Soares (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 2, pp. 757-766.
- CHILÈS J.P., GENTIER S., 1993.- Geostatistical modelling of a single fracture. In *Geostatistics Tróia '92*, A. Soares (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 1, pp. 95-108.
- BLANCHIN R., CHILÈS J.P., 1993.- The Channel Tunnel: geostatistical prediction of the geological conditions and its validation by the reality. *Mathematical Geology*, Vol. 25, No. 7, pp. 963-974.
- CHILÈS J.P., COURRIOUX G., DEVERLY F., RENARD P., 1993.- 3-D geometric modelling of fault and layer systems using GOCAD software: example of the Soultz horst (Alsace, France). *Geoinformatics*, Vol. 4, No. 3, pp. 209-218.
- CHILÈS J.P., GUERIN F., BILLAUX D., 1992.- 3D stochastic simulation of fracture network and flow at Stripa conditioned on observed fractures and calibrated on measured flow rates. In: *Rock Mechanics*, J.R. Tillerson and W.R. Wawersik (eds.), A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp. 533-542.
- CHILÈS J.P., 1992.- The use of external-drift kriging for designing a piezometric observation network. In *Geostatistical Methods: Recent Developments and Applications in Surface and Subsurface Hydrology*, A. Bardossy (ed.), UNESCO, IHP-IV, Paris, pp. 11-20.
- BLANCHIN R., CHILÈS J.P., 1992.- Geostatistical modelling of geological layers and optimization of survey design for the Channel tunnel. In *Three-Dimensional Computer Graphics in Modelling Geologic Structures and Simulating Geologic Processes*, R. Pflug and J.W. Harbaugh (eds.), Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 41, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 251-256.
- GENTIER S., CHILÈS J.P., RISS J., 1991.- Analyse et simulation d'une surface de fracture rocheuse. *Cahiers de Géostatistique*, Fasc. 1, E.N.S. des Mines de Paris, pp. 77-87.
- CHILÈS J.P., GABLE R., MORIN R.H., 1991.- Contribution de la géostatistique à l'étude de la thermicité des rides océaniques du Pacifique. *Cahiers de Géostatistique*, Fasc. 1, E.N.S. des Mines de Paris, pp. 51-61.
- CHILÈS J.P., 1991.- Application du krigeage avec dérive externe à l'implantation d'un réseau de surveillance piézométrique. *Sciences de la Terre - Informatique Géologique*, Vol. 30, pp. 131-147.
- BLANCHIN R., CHILÈS J.P., MARGRON P., PIRAUD J., 1989.- Tunnel sous la Manche : calcul de la coupe géologique par interpolation géostatistique entre sondages et profils géophysiques. *Comptes rendus du XII^e Congrès International de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Rio de Janeiro, 13-18 août 1989*, A.A. Balkema, Rotterdam, Pays-Bas, pp. 809-810.
- BLANCHIN R., BONNEFOY D., CHILÈS J.P., GUILLEN A., LAVILLE P., 1989.- Systèmes informatiques pour les grands projets de génie civil et d'environnement : GDM et MARICA. *Actes VISUDA 89* (Conférence internationale et exposition sur l'informatique graphique pour la défense, l'administration et les grands projets, Paris, Juin), pp. 187-192.

- BLANCHIN R., CHILÈS J.P., MARGRON P., 1989.- Détermination de la précision des informations géologiques grâce à la géostatistique. In *Le tunnel sous la Manche - Géologie et géotechnique*, P. Duffaut et P. Margron (eds.), Presses de l'E.N.S. des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 177-185.
- BLANCHIN R., CHILÈS J.P., DEVERLY F., 1989.- Some applications of geostatistics to civil engineering. In *Geostatistics*, M. Armstrong (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 2, pp. 785-795.
- CHILÈS J.P., 1989.- Modélisation géostatistique de réseaux de fractures. In *Geostatistics*, M. Armstrong (ed.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, Vol. 1, pp. 57-76.
- BILLAUX D., CHILÈS J.P., HESTIR K., LONG J., 1989.- Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass. An example from the Fanay-Augères mine. *International Journal of Rock Mechanics and Mineral Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 26, No. 3/4, pp 281-299.
- HESTIR K., LONG J., CHILÈS J.P., BILLAUX D., 1989.- Some techniques for stochastic modeling of three-dimensional fracture networks. In *Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling*, B.E. Buxton (ed.), Battelle Press, Columbus, Ohio, pp. 495-519.
- CHILÈS J.P., 1989.- Three-dimensional geometric modelling of a fracture network. In *Geostatistical, Sensitivity, and Uncertainty Methods for Ground-Water Flow and Radionuclide Transport Modeling*, B.E. Buxton (ed.), Battelle Press, Columbus, Ohio, pp. 361-385.
- JACQUIN P., CHILÈS J.P., ROBIDA F., TOUFFAIT Y., 1988.- Evaluation de gisement. In *Informatique dans l'industrie minière, Industrie Minière - Mines et Carrières - les Techniques*, No. 4/5-88, pp. 45-58.
- CHILÈS J.P., 1988.- Fractal and geostatistical methods for modelling of a fracture network. *Mathematical Geology*, Vol. 20, No. 6, pp. 631-654.
- LONG J., BILLAUX D., HESTIR K., CHILÈS J.P., 1987.- Some geostatistical tools for incorporating spatial structure in fracture network modelling. *Proceedings of the 6th International Congress on Rock Mechanics of ISRM*, Montreal, t. 1, pp. 171-176.
- HESTIR K., CHILÈS J.P., LONG J., BILLAUX D., 1987.- Three-dimensional modelling of fractures in rock: from data to a regionalized parent-daughter model. In *Flow and Transport Through Unsaturated Fractured Rock*, D.D. Evans and T.J. Nicholson (eds.), Geophysical Monograph Series, Vol. 42, American Geophysical Union, Washington, D.C., pp. 133-140.
- GENTIER S., CHILÈS J.P., RISS J., 1987.- Reconstitution d'une surface de fracture rocheuse par krigeage. *Journal de Microscopie et Spectroscopie Electronique*, Vol. 12, pp. 169-172.
- BENZ J.P., CHILÈS J.P., DUMAS J.P., 1985.- Essais comparés de deux méthodes d'abattage en filons minces. *Industrie Minière - Mines et Carrières - les Techniques*, No. 10-85, pp. 469-473.
- CHILÈS J.P., GUILLEN A., 1984.- Variogrammes et krigeages pour la gravimétrie et le magnétisme. *Sciences de la Terre - Informatique Géologique*, No. 20, pp. 455-468.
- THOMAS D., CHILÈS J.P., GUILLEN A., 1984.- Geostatistics for accurate gravimetry mapping. *Proceedings of the 18th APCOM International Symposium*, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 11-20.
- CHILÈS J.P., 1984.- Simulation of a nickel deposit: problems encountered and practical solutions. In *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, G. Verly, M. David, A.G. Journel, and A. Maréchal (eds.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, Part 2, pp. 1015-1030.
- CHILÈS J.P., GABLE R., 1984.- Three dimensional modelling of a geothermal field. In *Geostatistics for Natural Resources Characterization*, G. Verly, M. David, A.G. Journel, and A. Maréchal (eds.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, Part 2, pp. 587-598.
- CHILÈS J.P., LABROT J.C., LEFEUVRE E., MARBEAU J.P., THOMAS D., 1981.- *La géostatistique*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France, 28 p.
- DELFINER P., CHILÈS J.P., 1977.- Conditional simulation: a new Monte-Carlo approach to probabilistic evaluation of hydrocarbon in place. *SPE paper 6985*. First edition, Technical Report N-526, Centre de Géostatistique, Fontainebleau, France.

- CHILÈS J.P., 1977.- Approche géostatistique des phénomènes non stationnaires dans le plan. In *Proceedings of Příbram Symposium on Science and Technique, Mathematical Methods in Geology, Příbram, Czechoslovakia, 17-21 October 1977*, pp. 235-250.
- CHILÈS J.P., 1976.- How to adapt kriging to non-classical problems: three case studies. In *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*, M. Guarascio, M. David, and C. Huijbregts (eds.), D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, pp. 69-89.
- CHAUVET P., PAILLEUX J., CHILÈS J.P., 1976.- Analyse objective des champs météorologiques par cokrigeage. *La Météorologie - Sciences et Techniques*, 6^e Série, n° 4, pp. 37-54.
- CHILÈS J.P., 1975.- Aplicacion del krigeage a la cartografia de los fondos submarinos. In *Aplicaciones de la teoria de la variable regionalizada*, J.M. Estefania (ed.), Monografias, No. 3, Catedra de Matematicas, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid, pp. 103-115.
- CHILÈS J.P., 1975.- Reconstitution por krigeage de la superficie topografica a partir de diversos esquemas de muestreo fotogrametrico. In *Aplicaciones de la teoria de la variable regionalizada*, J.M. Estefania (ed.), Monografias, No. 3, Catedra de Matematicas, Escuela Tecnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid, pp. 117-128.
- CHILÈS J.P., MATHERON G., 1975.- Interpolation optimale et cartographie. *Annales des Mines*, Novembre, pp. 19-26.
- CHILÈS J.P., DELFINER P., 1975.- Reconstitution par krigeage de la surface topographique à partir de différents schémas d'échantillonnage photogrammétrique. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie*, n° 57, pp. 42-50.
- CHILÈS J.P., CHAUVET P., 1975.- Le krigeage : méthode de cartographie des fonds marins. *Revue Hydrographique Internationale*, Vol. LII, n° 1, pp 29-45. / Kriging: a method for the cartography of the sea floor. *International Hydrographic Review*, Vol. LII, No. 1, pp. 25-41.

Résumés, posters

20 références.

Notes et rapports techniques, notices

60 références.